SERGIU CĂLIN
STELIAN POPESCU

AUTOMATIZĂRI ȘI PROTECȚIA PRIN RELEE



MANUAL PENTRU LICEE INDUSTRIALE CU PROFIL DE ELECTROTEHNICĂ, CLASA A XII-a, ȘI ȘCOLI DE MAIȘTRI

prof. dr. ing. SERGIU CĂLIN
conf. dr. ing. STELIAN POPESCU

AUTOMATIZĂRI ȘI PROTECȚIA PRIN RELEE

MANUAL PENTRU LICEE INDUSTRIALE CU PROFIL DE ELECTROTEHNICĂ, CLASA A XII-a (SPECIALIZAREA: ELECTRICIAN PENTRU CENTRALE ȘI REȚELE ELECTRICE), ȘI ȘCOLI DE MAIȘTRI



EDITURA DIDACTICĂ ȘI PEDAGOGICĂ
BUCUREȘTI — 1977

Manualul a fost revizuit pe baza programei școlare aprobate de Ministerul Educației și Învățămîntului

Materialul a fost elaborat astfel:
Prof. univ. dr. ing. **SERGIU CĂLIN**: cap. 1, 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14
Conf. dr. ing. **STELIAN POPESCU**: cap. 3, 5, 6

Referent: ing. PETRE COLUMBEANU

Redactor: ing. RODICA DUMITRAȘCU
Tehnoredactor: ELENA PETRICĂ
Grafician: VICTOR WEGEMANN

CAPITOLUL 1

INTRODUCERE

A. OBIECTIVELE PROTECȚIEI PRIN RELEE

Protecția prin relee a unei instalații electrice este formată din ansamblul aparatelor și dispozitivelor destinate să comande în mod automat deconectarea instalației în cazul apariției unui defect sau a unui regim anormal de funcționare, periculos pentru instalație; în cazul defectelor și regimurilor anormale care nu prezintă pericol imediat, protecția prin relee nu comandă deconectarea instalației, ci semnalizează apariția defectului sau regimului anormal.

Pentru deconectarea instalației, protecția prin relee comandă declanșarea întrerupătoarelor care leagă instalația protejată de celelalte elemente ale sistemului electric.

Separarea automată a instalației defecte de restul elementelor sistemului urmărește trei obiective:

- Să împiedice dezvoltarea defectului, respectiv extinderea și agravarea efectelor acestuia, asupra altor instalații din sistemul electric și eventuala transformare a defectului într-o avarie de sistem.
- Să preîntîmpine distrugerea instalației în care a apărut defectul, prin întreruperea tuturor posibilităților de alimentare a defectului.
- Să restabilească un regim normal de funcționare pentru restul sistemului electric și să asigure astfel continuitatea alimentării consumatorilor cu energie electrică.

Protecția prin relee are deci rolul de a controla permanent regimurile de funcționare ale instalațiilor din sistemele electrice și de a asigura lichidarea automată a defectelor și a regimurilor anormale periculoase.

Astfel, protecțiile prin relee au o funcționare automată. Ele ocupă un loc deosebit de important în ansamblul echipamentelor de automatizare cu care sînt prevăzute sistemele electrice.

B. NECESITATEA LICHIDĂRII AUTOMATE A DEFECTELOR

Lichidarea automată a defectelor este impusă de anumite particularități ale funcționării sistemelor energetice, în care au loc procesele de producție, transport și distribuție a energiei electrice.

Cele mai importante particularități sînt următoarele:

● Apariția unor defecte, cum sînt de exemplu scurtcircuitele, determină efecte care se pot propaga cu foarte mare rapiditate asupra unor mari părți ale sistemului electric și pot determina perturbarea alimentării cu energie a unui mare număr de consumatori.

Scurtcircuitele au efecte electrodinamice și termice care pot deteriora părți din instalațiile prin care circulă curenții de defect, precum și efecte de perturbare a sincronismului generatoarelor care funcționează în paralel în sistemul electric și deci pot conduce la ieșirea din sincronism.

● Întrucît pînă în prezent nu există posibilitatea de a se crea rezerve de energie electrică la scara necesară unui sistem electric, grupurile generatoare trebuie să urmărească în permanență variațiile puterii cerute de consumatori. Dacă defectele apărute nu sînt lichidate corect și foarte rapid, atunci poate fi afectată alimentarea unui număr important de consumatori și deci funcționarea acestora.

● Consumatorii alimentați de sistemele electrice sînt reprezentați de întreprinderile industriale din diverse ramuri de producție, de transportul electric, de telecomunicații, de iluminat și de alte utilizări și ca urmare întreruperile în alimentarea cu energie electrică pot conduce la mari pierderi pentru economia națională.

● Diferitele elemente componente ale sistemelor energetice (centrale și stații electrice, consumatori etc.) se găsesc la distanțe mari, uneori de zeci sau sute de kilometri, și ca urmare lichidarea corectă a defectelor poate necesita coordonarea comenzilor de declanșare a unor întrerupătoare situate la mari distanțe.

Aceste particularități impun o siguranță foarte ridicată de funcționare a sistemelor electrice, menținerea continuității alimentării consumatorilor, lichidarea corectă a defectelor în fracțiuni de secundă.

În stadiul actual de dezvoltare a sistemelor electrice, intervenția personalului de tură pentru lichidarea defectelor (prin comandă manuală a declanșării întrerupătoarelor) nu se poate efectua în nici un caz cu rapiditatea și precizia necesară. Datorită acestui fapt este neapărat necesară lichidarea automată a defectelor și deci introducerea echipamentelor de protecție prin relee, fără acestea nefiind posibilă funcționarea sistemelor electrice.

C. STRUCTURA ECHIPAMENTELOR DE PROTECȚIE PRIN RELEE

Pentru a asigura controlul permanent al regimurilor de funcționare ale instalațiilor electrice și lichidarea automată a defectelor și regimurilor periculoase, protecția prin relee trebuie să includă anumite elemente în structura sa, descrise în cele ce urmează.

● Un prim grup de elemente este reprezentat de elementele de intrare, care primesc de la transformatoarele de curent și de tensiune informații asupra regimului de funcționare al instalației protejate; aceste informații sînt conținute în valorile și defazajele curenților și tensiunilor măsurate de transformatoarele de curent și de tensiune.

Elementele de intrare îndeplinesc funcțiuni de filtrare, amplificare sau determinare a unor mărimi suplimentare, obținute cu ajutorul curenților și

tensiunilor primite de la transformatoarele de măsură. Astfel, de exemplu, elementele de intrare pot conține filtre de componente simetrice sau filtre de armonici superioare, necesare funcționării corecte a anumitor tipuri de protecții, analizate în capitolele următoare.

Elementele de intrare pot fi reunite într-un bloc denumit blocul de intrare, alimentat de transformatoarele de curent și de tensiune. În unele tipuri de scheme — denumite scheme funcționale — fiecare bloc este reprezentat printr-un dreptunghi, iar semnalele transmise între blocuri sînt reprezentate simbolic prin săgeți. Folosind această reprezentare în figura 1.1, pentru protecția unei linii *L*, blocul de intrare (alimentat de transformatoarele de curent *TC* și de tensiune *TT*) este notat cu *BI*.

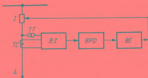


Fig. 1.1. Schema funcțională a protecției prin relee.

● Un al doilea grup de elemente este reprezentat de elementele de prelucrare și decizie, care primesc anumite mărimi de la blocul de intrare și le prelucrează, efectuînd operații logice și de calcul pentru a stabili dacă în instalația protejată există sau nu un defect. Dacă rezultă prezența unui defect, elementele de prelucrare și decizie (alcătuind blocul de prelucrare și decizie) transmit elementelor din blocul următor decizia de declanșare a întrerupătoarelor instalației protejate. În figura 1.1 blocul de prelucrare și decizie este notat prin *BPD*.

● Al treilea grup de elemente este reprezentat de elementele de ieșire, formînd blocul de ieșire, notat prin *BE* în figura 1.1. Elementele acestui bloc au rolul de a asigura o putere suficientă pentru comanda declanșării întrerupătoarelor instalației protejate și a transmiterii semnalizărilor necesare.

În exemplul din figura 1.1, blocul *BE* comandă declanșarea întrerupătorului *I*.

D. DEZVOLTAREA TEHNICII PROTECȚIEI PRIN RELEE LA NOI ÎN ȚARĂ

Condițiile pentru introducerea și dezvoltarea automatizării în energetică, ca și în celelalte ramuri ale economiei noastre naționale, au fost create în anii regimului democrat-popular, odată cu dezvoltarea în ritm rapid a industriei, datorită politicii partidului și guvernului privind asigurarea bazei tehnico-materiale a construirii socialismului în țara noastră.

În decursul primului plan de electrificare, pe perioada 1951—1960, și în cincinalele următoare au fost continuu perfecționate protecțiile prin relee ale generatoarelor, transformatoarelor, barelor colectoare, liniilor de transport și distribuție, fiind elaborate și fabricate la noi în țară numeroase tipuri de protecții și de relee.

În prezent, industria noastră electrotehnică produce o gamă largă de relee și de echipamente de protecție. Astfel, Intreprinderea Electromagnetica produce relee de curent *RC*, relee de tensiune *RT*, relee de timp *RTp*, relee de curent cu acțiune temporizată *RTpC*, relee de semnalizare *RdS*, relee intermediare *RI*. Dezvoltarea producției de relee este ilustrată de faptul că pro-

ducția de relee a Intreprinderii Electromagnetica a crescut de la 40 000 de bucăți în anul 1960 la 625 000 de bucăți în anul 1975.

La Institutul de cercetări pentru modernizarea instalațiilor energetice (ICEMENERG) au fost elaborate și produse relee de simplă punere la pămînt în rotorul generatoarelor *RSPP*, relee de dublă punere la pămînt în rotorul generatoarelor *RDPP*, relee diferențiale cu saturație *RDS-1*, *RDS-2*, *RDS-3*, relee diferențiale tranzistorizate cu frînare funcție de armonica a doua *RDS-4*, relee direcționale tranzistorizate *RDc*, relee de punere la pămînt *RPP* cu filtre de armonici superioare, indicatoare selective de punere la pămînt *ISP*, relee direcționale acționînd în regim tranzistoriu *RDT*, protecții de distanță tranzistorizate *PD*, relee diferențiale pentru linii *RDL*, relee intermediare de curent alternativ *RICA*, filtre-relee de componente inverse ale curentului *FRC-2A* și ale tensiunii *FRT-2*, blocuri de alimentare în curent continuu *BACC*, dispozitive de protecție în curent alternativ *DPCA*.

Directivele Congresului al XI-lea al Partidului Comunist Român cu privire la planul cincinal 1976—1980 și liniile directoare ale dezvoltării economico-sociale a României pentru perioada 1981—1990 prevăd atingerea unei producții anuale de energie electrică de 75—80 miliarde kWh în anul 1980 și a unei producții de 130—140 miliarde kWh în anul 1990, acest ritm ridicat de dezvoltare impunînd perfecționări importante ale echipamentelor de protecție prin relee.

REZUMAT

● Protecția prin relee este formată din ansamblul aparatelor și dispozitivelor destinate să comande automat deconectarea instalației electrice protejate în cazul apariției unui defect sau a unui regim anormal periculos.

● Deconectarea instalației defecte urmărește trei obiective: să împiedice extinderea defectului, să preîntîmpine distrugerea instalației protejate și să restabilească un regim normal de funcționare pentru restul sistemului electric.

● Lichidarea automată a defectelor este impusă de particularitățile de funcționare ale sistemelor energetice, cele mai importante particularități fiind următoarele: defectele pot perturba alimentarea unui mare număr de consumatori și pot astfel conduce la mari pierderi pentru economia națională, grupurile generatoare trebuie să urmărească în permanență variațiile puterii cerute de consumatori, lichidarea corectă a defectelor poate necesita coordonarea comenzilor de declanșare a unor întrerupătoare situate la mari distanțe.

● În structura echipamentelor de protecție prin relee sînt incluse elemente de intrare, elemente de prelucrare și decizie, elemente de ieșire.

● Industria noastră electrotehnică produce o gamă largă de relee și echipamente de protecție, printre care se numără: relee de curent *RC*, relee de tensiune *RT*, relee de timp *RTp*, relee de curent cu acțiune temporizată *RTpC*, relee de semnalizare *RdS*, relee intermediare *RI* (fabricate la Întreprinderea Electromagnetica), relee de simplă punere la pămînt *RSPP*, relee de dublă punere la pămînt *RDPP*, relee diferențiale cu saturație *RDS-1*, *RDS-2*, *RDS-3*, relee diferențiale tranzistori-

zate *RDS-4*, relee direcţionale tranzistorizate *RDc*, relee de punere la pămînt *RPP*, indicatoare selective de punere la pămînt *ISP*, relee direcţionale acţionînd în regim tranzistoriu *RDT*, protecţii de distanţă *PD*, relee diferenţiale pentru linii *RDL*, relee intermediare de curent alternativ *RICA*, filtre-relee de componente inverse *FRC-2A* şi *FRT-2*, blocuri de alimentare *BACC*, dispozitive de protecţie în curent alternativ *DPCA* (produse la ICEMENERG).

VERIFICAREA CUNOŞTINŢELOR

1. Care este rolul protecţiei prin relee?
   a) să asigure pornirea automată a instalaţiilor electrice?
   b) să asigure schimbarea automată a regimurilor de sarcină ale instalaţiilor electrice?
   c) să asigure comanda automată a deconectării instalaţiei electrice protejate în cazul defectelor sau regimurilor anormale periculoase?
2. Care sînt obiectivele deconectării instalaţiei electrice defecte?
   a) să determine reduceri ale consumului de energie?
   b) să micşoreze preţul de cost al energiei?
   c) să împiedice extinderea defectului şi distrugerea instalaţiei protejate şi să restabilească un regim normal de funcţionare pentru restul sistemului electric?
3. Care sînt elementele incluse în structura echipamentelor de protecţie prin relee?
   a) elemente de intrare, de prelucrare şi decizie şi de ieşire?
   b) elemente de convertire şi afişare?
   c) elemente de înregistrare?
4. La ce întreprindere sînt fabricate releele RC, RT, RTp, RTpC?
   a) Electromagnetica?
   b) ICEMENERG?
   c) Electroaparataj?

CAPITOLUL 2

CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND PROTECȚIA PRIN RELEE

A. DEFECTE ȘI REGIMURI ANORMALE ÎN SISTEMELE ELECTRICE

1. Defecte

Scurtcircuitele sînt defectele cele mai frecvente în sistemele electrice și apar cînd este străpunsă izolația între faze sau în raport cu pămîntul. În primul caz rezultă scurtcircuitele polifazate, iar în al doilea caz rezultă scurtcircuite monofazate sau puneri la pămînt, în funcție de tensiunea rețelei și de modul de tratare a neutrului rețelei.

Scurtcircuitele monofazate apar în rețele de tensiuni ridicate, deoarece la aceste tensiuni neutrele transformatoarelor sînt legate direct la pămînt și datorită acestui fapt străpungerea izolației între o fază și pămînt provoacă micșorarea considerabilă a impedanței circuitului și circulația unor curenți de valori foarte mari, mult mai mari decît curenții de sarcină normală. La noi în țară rețelele de înaltă tensiune în care neutrele transformatoarelor sînt legate direct la pămînt și deci pot apărea scurtcircuitele monofazate sînt rețelele de 110 kV și mai mult.

De asemenea, scurtcircuite monofazate pot apărea și la tensiunile de funcționare a consumatorilor (tensiuni de 380/220 V și 208/120 V), întrucît și în aceste rețele punctele neutre ale transformatoarelor sînt legate direct la pămînt.

Valori foarte mari ale curenților apar și la scurtcircuitele între faze, tot din motivul micșorării considerabile a impedanței circuitului în care a apărut defectul.

În rețelele cu tensiuni sub 110 kV neutrele bobinajelor în stea ale transformatoarelor sînt legate la pămînt prin bobine de stingere sau sînt izolate, iar neutrele generatoarelor sînt de regulă izolate. Ca urmare, străpungerea izolației unei faze în raport cu pămîntul este însoțită de circulația unor curenți mici, întrucît curenții de defect se închid prin bobinele de stingere sau prin capacitățile dintre celelalte faze și pămînt, deci prin impedanțe foarte mari.

Avînd în vedere valorile mici ale curenților la străpungerea izolației dintre o fază și pămînt în rețelele cu tensiunea sub 110 kV, aceste defecte nu sînt denumite scurtcircuite monofazate, ci puneri la pămînt.

De cele mai multe ori străpungerea izolației dintre faze sau dintre o fază și pămînt este însoțită de apariția unui arc electric, care are o impedanță redusă. În unele cazuri pot apărea și scurtcircuite fără arc (denumite *scurtcircuite directe* sau *nete*) de exemplu cînd două faze sînt scurtcircuitate printr-un conductor neizolat.

Scurtcircuitele, polifazate sau monofazate, reprezintă perturbări grave ale funcționării sistemelor electrice. Diversele generatoare din sistem debitează curenți de scurtcircuit spre locul defectului, care este alimentat de toate sursele, întrucît reprezintă un punct de impedanță minimă al sistemului.

Curenţii de scurtcircuit, datorită valorilor mari, au importante efecte electrodinamice şi termice şi pot provoca deteriorări sau distrugeri ale unor conductoare, aparate şi instalaţii, prezentînd şi pericol de incendiu.

Scurtcircuitele provoacă şi scăderi importante ale tensiunilor în zona defectului. Astfel, în cazul unui scurtcircuit direct, fără arc, tensiunea este nulă în punctul defectului şi tensiunile remanente la barele apropiate au valori mult reduse în comparaţie cu valorile din regim normal de funcţionare.

Datorită faptului că determină variaţii importante ale curenţilor şi tensiunilor, scurtcircuitele pot provoca ieşirea din sincronism a generatoarelor care funcţionează în paralel în cadrul unui sistem electric. Această ieşire din sincronism este denumită şi *pierderea stabilităţii sistemului electric*, iar fenomenele care o însoţesc sînt denumite *pendulări*.

Rezultă astfel că scurtcircuitele pot avea urmări foarte grave. Întrucît gravitatea efectelor unui scurtcircuit creşte cu durata (de persistenţă) a acestuia, este neapărat necesar ca lichidarea defectului să se facă într-un interval de timp cît mai scurt, deci protecţiile trebuie să acţioneze foarte rapid.

Punerile la pămînt monofazate nu prezintă un pericol imediat, întrucît sînt însoţite de curenţi mici de defect şi ca urmare nu este necesară o acţionare foarte rapidă a protecţiei.

În funcţie de locul apariţiei unei puneri la pămînt (pe o linie, în bobinajul statoric al unui generator etc.) protecţia comandă fie declanşarea întrerupătorului, fie o semnalizare.

Diferitele tipuri de defecte pot fi însoţite de apariţia anumitor componente simetrice.

Astfel, în cazul scurtcircuitelor bifazate apar componentele de secvenţă inversă ale tensiunilor şi curenţilor, datorită faptului că cele trei faze nu se mai găsesc în regim simetric.

Scurtcircuitele trifazate sînt scurtcircuite simetrice, însă în cazul scurtcircuitelor trifazate prin arc — care sînt cele mai numeroase — există totuşi un regim nesimetric în perioada iniţială a defectului (întrucît intervin arcuri electrice numai între două faze) şi ca urmare în această perioadă apar componente de secvenţă inversă.

În cazul defectelor monofazate, respectiv scurtcircuite monofazate sau puneri la pămînt monofazate, apar componentele de secvenţă homopolară ale tensiunilor şi curenţilor.

Întrucît apariţia unor componente de anumite secvenţe poate caracteriza tipul defectului, în multe scheme de protecţie sînt introduse filtre de componente inverse sau homopolare.

Pe lîngă scurtcircuitele polifazate şi defectele monofazate (scurtcircuite monofazate sau puneri la pămînt monofazate), în sistemele electrice pot apărea şi alte defecte. Astfel, în unele cazuri apare dubla punere la pămînt, reprezentînd două puneri la pămînt pe faze diferite, deci un scurtcircuit bifazat prin intermediul pămîntului.

Un alt tip de defect este constituit de întreruperea unei faze.

2. Regimuri anormale

Supraintensităţile reprezintă regimuri anormale frecvent întîlnite, constînd din creşteri ale curenţilor peste valoarea nominală, fără ca în instalaţia protejată să existe vreun defect. Supraintensităţile pot fi provocate fie de scurtcircuite apărute în afara instalaţiei protejate (denumite scurtcircuite exteri-

oare), fie de creşteri importante ale sarcinii alimentate de instalaţie, respectiv de suprasarcini.

Apariţia supraintensităţilor nu impune o deconectare imediată a instalaţiei protejate, dar timpul admisibil de persistenţă al acestor regimuri anormale este limitat, pentru a preîntîmpina deteriorări provocate de efectele termice ale curenţilor. De aceea protecţiile împotriva supraintensităţilor transmit comanda de declanşare sau de semnalizare numai după trecerea unui interval de timp stabilit, denumit temporizare.

Scăderile de tensiune reprezintă regimuri anormale provocate de scurtcircuite exterioare instalaţiei protejate. În aceste regimuri motoarele electrice alimentate cu tensiune redusă îşi micşorează turaţia sau se pot opri, rezultînd apoi dificultăţi pentru pornirea motoarelor la revenirea tensiunii ca urmare a lichidării defectului exterior.

Un alt regim anormal este reprezentat de scăderea frecvenţei, important parametru de calitate al energiei electrice. La scăderea frecvenţei se modifică regimul de funcţionare a anumitor mecanisme şi utilaje antrenate de motoarele electrice alimentate la o frecvenţă scăzută, rezultînd astfel o desfăşurare anormală a proceselor tehnologice în care intervin mecanismele şi utilajele respective.

Pendulările sînt regimurile anormale care apar la pierderea stabilităţii funcţionării în paralel a generatoarelor din sistemul electric, determinată de scurtcircuite exterioare instalaţiei protejate. Aceste regimuri anormale sînt însoţite de variaţii importante ale curenţilor şi tensiunilor, care pot provoca acţionări greşite ale anumitor tipuri de protecţii, cum sînt de exemplu protecţiile de distanţă (v. capitolul 14); pentru a fi preîntîmpinate asemenea acţionări greşite — care ar întrerupe alimentarea unor consumatori fără ca în instalaţia protejată să existe vreun defect — se pot prevedea în schemele de protecţie dispozitive de blocare împotriva acţionărilor greşite în timpul regimurilor anormale de pendulări.

Creşterile de tensiune sînt regimuri anormale care apar rar în sistemele electrice. De exemplu, în cazul creşterii turaţiei unui hidrogenerator (ca urmare a scăderii importante şi bruşte a sarcinii) are loc creşterea tensiunii la borne. Creşterile de tensiune sînt periculoase prin suprasolicitarea izolaţiei.

B. CONDIŢII IMPUSE PROTECŢIILOR PRIN RELEE

1. Condiţii impuse funcţionării protecţiei

● **Rapiditatea.** Întrucît efectele scurtcircuitelor se agravează şi se extind cu atît mai mult, cu cît creşte durata de existenţă a defectelor, funcţionarea rapidă a protecţiei reprezintă o condiţie deosebit de importantă. Rapiditatea acţionării protecţiei se impune îndeosebi în cazul scurtcircuitelor în generatoare şi transformatoare (pentru a evita deteriorări grave) şi în cazul scurtcircuitelor pe linii cu tensiuni ridicate, care pot periclita stabilitatea sistemului electric.

● **Selectivitatea.** Instalaţiile componente ale unui sistem electric sînt prevăzute cu protecţii prin relee. Aceste protecţii trebuie să funcţioneze în aşa fel încît, în cazul apariţiei unui scurtcircuit într-o anumită instalaţie, să fie comandată numai deconectarea acelei instalaţii (separarea instalaţiei defecte de restul sistemului este efectuată prin comanda declanşării între-

rupătoarelor instalației respective), iar restul instalațiilor din sistem să rămînă în funcțiune; o asemenea funcționare a protecțiilor se numește *funcționare selectivă.*

Selectivitatea constă deci în proprietatea protecțiilor prin relee de a alege (selecta) instalația defectă — din cadrul ansamblului tuturor instalațiilor sistemului — și de a comanda numai deconectarea acelei instalații.

Asigurarea unei funcționări selective a protecțiilor prin relee are o importanță deosebită pentru continuitatea alimentării consumatorilor dintr-un sistem electric. Astfel, în cazul unei acționări neselective, cînd protecția prin relee ar comanda deconectarea unor instalații fără defecte, ar fi întreruptă în mod inutil funcționarea consumatorilor alimentați de acele instalații, rezultînd pagube suplimentare pentru economia națională.

Pentru a acționa selectiv, protecția prin relee trebuie să comande declanșarea celor mai apropiate întrerupătoare de punctul în care a apărut scurtcircuitul, întrucît în acest mod rezultă întreruperea alimentării unui număr minim de consumatori, în comparație cu orice altă variantă de lichidare a defectului.

În cazul unor tipuri simple de protecții, selectivitatea poate fi asigurată prin introducerea unor temporizări, respectiv a unor întîrzieri (cu ajutorul unor relee de timp) în funcționarea protecției; prin această măsură nu mai poate fi însă asigurată condiția de rapiditate. Avînd în vedere caracterul contradictoriu al condițiilor de rapiditate și selectivitate, este necesar ca în fiecare caz să se aprecieze care dintre cele două condiții este mai importantă, pentru a i se da prioritate.

● **Siguranța.** Funcționarea unei protecții este sigură dacă protecția acționează întotdeauna cînd este necesar (deci nu are refuzuri în funcționare), și numai cînd este necesar (deci nu are acționări false în absența unor defecte în instalația protejată).

Siguranța funcționării unei protecții se obține prin proiectarea corectă a schemelor și ansamblelor, precum și prin utilizarea unui echipament de calitate ridicată. Siguranța protecției depinde deci și de siguranța echipamentului folosit, respectiv de posibilitatea unei utilizări îndelungate a echipamentului, fără ca acesta să se defecteze. Siguranța echipamentului — denumită și fiabilitate — este o condiție impusă realizării și construcției dispozitivelor și aparatelor de protecție.

Avînd în vedere urmările grave ale întîrzierii lichidării unui scurtcircuit, ca urmare a unui refuz în funcționarea unei protecții, condiția de siguranță are o importanță primordială.

● **Sensibilitatea.** Pentru ilustrarea condiției de sensibilitate se consideră o protecție care acționează la creșterea curentului din instalația protejată (realizată, de exemplu, cu relee maximale de curent), creștere care indică fie prezența unui scurtcircuit, fie apariția unei suprasarcini. Protecția este cu atît mai sensibilă, cu cît este mai mică creșterea curentului (peste valoarea normală) care provoacă acționarea protecției respective.

Sensibilitatea funcționării unei protecții este legată de sensibilitatea aparatajului folosit, fiind necesar aparataj care să consume o putere cît mai redusă pentru acționare, deci aparataj sensibil.

Aprecierea cantitativă a sensibilității unei protecții se exprimă printr-un coeficient numit *coeficient de sensibilitate*; în cazul protecției considerate, coeficientul de sensibilitate k_{sens} are expresia:

$$k_{sens} = \frac{I_{sc\,min}}{I_{pp}}, \qquad (2.1)$$

în care:

$I_{sc\,min}$ este valoarea minimă posibilă a curentului de scurtcircuit prin instalaţia protejată, la defecte apărute în limitele unor anumite zone stabilite;

I_{pp} — curentul de pornire al protecţiei.

Curentul de pornire al protecţiei reprezintă valoarea curentului primar (care circulă prin bobinajul primar al transformatoarelor de curent montate în circuitul instalaţiei protejate), pentru care releele de curent îşi închid contactele. Notînd cu n_{TC} raportul de transformare al transformatoarelor de curent, între curentul de pornire al protecţiei I_{pp} (curent primar) şi curentul de pornire al releului I_{pr} (curent secundar) există relaţia:

$$\frac{I_{pp}}{I_{pr}} = n_{TC}. \qquad (2.2)$$

Normativul în vigoare la noi în ţară prevede valorile minime pentru coeficienţii de sensibilitate ai diverselor tipuri de protecţii.

● **Independenţa faţă de regimul momentan de exploatare.** În sistemele electrice au loc diferite regimuri de exploatare: cu toate generatoarele în funcţiune sau numai cu o parte din ele, cu diverse configuraţii ale reţelei de transport şi distribuţie, cu un număr mai mare sau mai mic de consumatori conectaţi etc. Pentru fiecare instalaţie componentă a sistemului se poate determina un *regim maxim* şi un *regim minim* de funcţionare, în funcţie de factorii menţionaţi mai înainte.

Regimul maxim pentru o anumită instalaţie este acel regim de funcţionare în care apariţia unui scurtcircuit determină circulaţia unui curent maxim, prin instalaţia respectivă, în comparaţie cu toate celelalte regimuri posibile. În mod analog se poate defini şi regimul minim.

Funcţionarea protecţiei trebuie să fie independentă de regimul momentan de exploatare, ceea ce înseamnă că protecţia trebuie să acţioneze corect independent de regimul de funcţionare în care se găseşte instalaţia protejată în momentul apariţiei defectului.

Pentru asigurarea respectării condiţiei de independenţă faţă de regimul de exploatare, funcţionarea corectă a unei protecţii trebuie verificată la defecte apărute în regimul minim şi în regimul maxim al instalaţiei protejate.

2. Condiţii impuse realizării şi construcţiei echipamentului de protecţie

● **Eficienţa economică.** Dintre toate soluţiile echivalente din punct de vedere tehnic, care pot rezulta la proiectarea unei protecţii prin relee, trebuie aleasă varianta cea mai economică, rezultînd astfel cea mai bună soluţie din punct de vedere tehnico-economic.

● **Gabarite reduse.** Pentru reducerea dimensiunilor panourilor de protecţie şi, în general, a spaţiilor afectate protecţiilor prin relee este necesar ca gabaritele echipamentului de protecţie să fie cît mai reduse.

Din acest punct de vedere, releele electronice prezintă avantaje deosebite, datorită posibilităţilor importante de miniaturizare, deci de micşorare a gabaritelor.

● **Tipizarea subansamblelor.** Realizarea echipamentului de protecţie din subansamble tipizate permite ca operaţiile de montaj, verificare,

încercare sau reparații să se efectueze în condiții mai ușoare. De asemenea, în cazul unui defect apărut într-un echipament de protecție poate fi înlocuit numai subansamblul defect, celelalte subansamble rămînînd după aceea în funcțiune.

Datorită acestor avantaje, tipizarea subansamblelor reprezintă un obiectiv care este urmărit cu insistență din ce în ce mai mare în construcția echipamentului de protecție.

● **Invariabilitatea parametrilor.** Pentru ca funcționarea corectă a unei protecții să poată fi asigurată pentru o perioadă de utilizare suficient de îndelungată, este necesar ca parametrii elementelor componente să nu sufere variații, valorile lor fiind menținute constante cu un grad ridicat de precizie; această condiție de invariabilitate a parametrilor este deosebit de importantă pentru asigurarea siguranței și selectivității în funcționarea protecției.

Măsuri pentru obținerea condiției de invariabilitate sînt necesare îndeosebi în cazul protecțiilor electronice, pentru eliminarea influenței unor factori exteriori (de exemplu, temperatura) asupra parametrilor releelor realizate cu elemente semiconductoare.

C. PRINCIPALELE TIPURI DE PROTECȚII PRIN RELEE

1. Protecții de curent

Protecțiile de curent sînt de regulă protecții maximale, acționînd la creșterea curentului pînă la atingerea sau depășirea unei valori stabilite (curent de pornire al protecției I_{pp}), creștere care indică prezența unui scurtcircuit sau a unei suprasarcini.

Condiția de acționare are deci aspectul:

$$I \geqslant I_{pp}, \tag{2.3}$$

unde I este curentul din instalația protejată (curent primar).

Pentru ca să nu existe posibilitatea unei acționări greșite în regimuri normale ale instalației protejate, cînd curentul I are valoarea nominală I_n sau valoarea curentului maxim de sarcină $I_{sarc\,max}$ prevăzut pentru instalația respectivă, este necesar ca valoarea curentului de pornire I_{pp} să fie aleasă mai mare decît curentul nominal și decît curentul maxim de sarcină, rezultînd deci relațiile:

$$I_{pp} > I_n; \tag{2.4}$$

$$I_{pp} > I_{sarc\,max}. \tag{2.5}$$

Protecțiile maximale de curent se realizează cu relee de curent cu contacte normal deschise, care se închid la creșterea curentului peste valoarea de pornire.

2. Protecții de tensiune

Protecțiile de tensiune pot fi protecții minimale sau protecții maximale.

● **Protecțiile minimale**, care acționează la scăderea tensiunii (ceea ce indică prezența unui scurtcircuit), sînt cele mai frecvent utilizate.

Condiția de acționare a acestor protecții este:

$$U \leqslant U_{pp}, \tag{2.6}$$

în care:

U este tensiunea controlată, din punctul de instalare a protecției;
U_{pp} — tensiunea de pornire a protecției, respectiv valoarea tensiunii primare (aplicată bobinajului primar al transformatorului de tensiune care alimentează releele protecției) la care are loc acționarea protecției, deci închiderea contactelor releelor.

Tensiunea secundară (tensiunea cu care bobinajul secundar al transformatorului de tensiune alimentează releele) la care are loc închiderea contactelor releelor, deci acționarea protecției, se numește tensiune de pornire a releului și se notează cu U_{pr}.

Între tensiunile U_{pp} și U_{pr} are loc o relație analogă cu relația (2.2):

$$\frac{U_{pp}}{U_{pr}} = n_{TT}, \tag{2.7}$$

în care n_{TT} este raportul de transformare a transformatorului de tensiune. Pentru ca protecțiile minimale de tensiune să nu acționeze greșit în regimuri normale ale instalației protejate, cînd tensiunea are valoarea nominală U_n sau valoarea minimă de exploatare $U_{min\ expl}$, este necesar ca valoarea tensiunii de pornire să fie aleasă mai mică decît valorile menționate, rezultînd deci relațiile:

$$U_{pp} < U_n; \tag{2.8}$$

$$U_{pp} < U_{min\ expl}. \tag{2.9}$$

Protecțiile minimale de tensiune se realizează cu relee minimale de tensiune, avînd contacte normal închise: cînd tensiunea are valori corespunzătoare regimurilor normale de funcționare ale instalației protejate, armătura mobilă a releelor este atrasă și contactele sînt deschise, iar la scăderea tensiunii pînă la valoarea de pornire — sau sub această valoare — armătura este eliberată și contactele se închid.

● **Protecțiile maximale** de tensiune acționează la creșterea tensiunii și au o utilizare restrînsă (de exemplu, la hidrogeneratoare, la linii de tensiuni înalte).

La aceste protecții, condiția de acționare are un aspect analog cu cel din relația (2.3):

$$U \geqslant U_{pp}, \tag{2.10}$$

iar între tensiunea de pornire a protecției U_{pp} și tensiunea nominală U_n există o relație asemănătoare cu relația (2.4):

$$U_{pp} > U_n. \tag{2.11}$$

Protecțiile maximale de tensiune se realizează cu relee maximale de tensiune cu contacte normal deschise, care se închid la creșterea tensiunii pest valoarea de pornire.

3. Protecții maximale direcționale

Spre deosebire de protecțiile de curent, care acționează numai în funcție de valoarea efectivă a curentului din instalația protejată, protecțiile maximale direcționale acționează atît în funcție de valoarea efectivă a curentului,



Fig. 2.1. Ilustrarea circulației puterilor pe linii cu alimentare bilaterală: *a* — în regim normal; *b* — în cazul unui scurtcircuit.

cît și în funcție de defazajul dintre curentul și tensiunea din punctul de instalare a protecției.

Astfel, considerînd cazul celor două linii cu alimentare bilaterală din figura 2.1, se presupune că generatoarele ambelor centrale alimentează în regim normal consumatorii principali racordați la barele stației *B* și, ca urmare, circulația puterilor pe linii este indicată prin săgețile din figura 2.1, *a*. Dacă apare un scurtcircuit pe linia *L-1* în punctul *K*, atunci toate generatoarele alimentează punctul de defect, întrucît acesta reprezintă un punct de impedanță minimă în sistem (datorită străpungerii izolației) ; ca urmare, circulația puterilor pe linii are sensurile indicate prin săgețile din figura 2.1, *b*.

Se constată că la unul din capetele liniei defecte *L-1* are loc schimbarea sensului de circulație a puterii atunci cînd se trece de la regimul normal la regimul de scurtcircuit pe linie. În mod analog, în cazul unui scurtcircuit pe linia *L-2* apare o schimbare a sensului de circulație a puterii la unul din capetele acestei linii.

Schimbarea sensului de circulație a puterii implică o schimbare importantă (cu aproximativ 180°) a defazajului dintre curentul și tensiunea de la capătul respectiv al liniei defecte.

Protecțiile maximale direcționale controlează defazajul dintre curent și tensiune, acționînd în cazul unor variații mari ale acestui defazaj, ceea ce indică apariția unui scurtcircuit în instalația protejată.

În componența protecțiilor maximale direcționale intră relee direcționale, care controlează defazajul menționat și care — în acest scop — sînt prevăzute cu bobine de curent și de tensiune (sau cu circuite de curent și de tensiune, în cazul releelor electronice).

Pentru studiul protecțiilor prin relee se obișnuiește în mod curent ca în scheme să fie notate convențional și sensuri ale curenților din diferite puncte; în realitate, aceste sensuri corespund valorilor instantanee (pozitive sau negative) ale curenților din punctele menționate, și deci după terminarea fiecărei semiperioade a curenților alternativi sensurile respective se inversează. În mod riguros, în locul sensurilor convenționale ar trebui definite defazajele dintre curenți și tensiuni, dar notarea sensurilor convenționale este utilizată frecvent, deoarece ilustrează ușor funcționarea sistemului electric și a protecțiilor într-un anumit moment.

4. Protecții diferențiale

Protecțiile diferențiale acționează în funcție de diferența curenților din două puncte ale instalației protejate (curenți considerați pe aceeași fază) și sînt de două tipuri: protecții diferențiale longitudinale și protecțiile diferențiale transversale.

● **Protecțiile diferențiale longitudinale** acționează în funcție de diferența curenților de la capetele zonei protejate. Astfel, în cazul unei linii cu

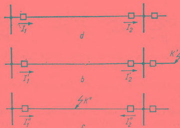


Fig. 2.2. Reprezentarea circulației curenților pentru ilustrarea principiului de funcționare a protecțiilor diferențiale longitudinale:

a — în regim normal; *b* — în cazul unui scurtcircuit exterior; *c* — în cazul unui scurtcircuit pe linia protejată.

alimentare bilaterală (fig. 2.2), curenții $\underline{I}_1$ și $\underline{I}_2$, respectiv $\underline{I}_1'$ și $\underline{I}_2'$ sînt egali în regim normal (fig. 2.2, *a*) sau de scurtcircuit exterior, în punctul K'(fig. 2.2, *b*), deci diferența acestor curenți este nulă în regimurile menționate:

$$\underline{I}_1 - \underline{I}_2 = 0; \tag{2.12}$$

$$\underline{I}_1' - \underline{I}_2' = 0. \tag{2.13}$$

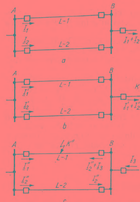


Fig. 2.3. Reprezentarea circulației curenților pentru ilustrarea principiului de funcționare a protecțiilor diferențiale transversale:

a – în regim normal; *b* – în cazul unui scurtcircuit exterior; *c* — în cazul unui scurtcircuit pe una din liniile paralele.

În cazul unui scurtcircuit pe linia protejată, în punctul K'' (fig. 2.2, *c*), curenții $\underline{I}_1''$ și $\underline{I}_2''$ nu mai sînt egali, respectiv $\underline{I}_1'' \neq \underline{I}_2''$ și, ca urmare:

$$\underline{I}_1'' - \underline{I}_2'' \neq 0. \tag{2.14}$$

Din relațiile (2.13) și (2.14) se constată că protecțiile diferențiale longitudinale se pot comporta în mod diferit la defecte exterioare și la defecte în zonă, ceea ce asigură selectivitatea funcționării acestor protecții.

● **Protecțiile diferențiale transversale** acționează în funcție de diferența curenților din două circuite paralele. În figura 2.3, principiul de funcționare al acestor protecții este ilustrat pentru cazul a două linii paralele, *L-1*, *L-2*, avînd aceeași lungime și aceeași impedanță specifică (pe unitatea de lungime).

În regim normal (fig. 2.3, *a*) sau de scurtcircuit exterior în punctul K' (fig. 2.3, *b*), curenții $\underline{I}_1$ și $\underline{I}_2$, respectiv $\underline{I}_1'$ și $\underline{I}_2'$ (circulînd prin cele două linii paralele la capetele dinspre stația *A*), sînt egali și diferența lor este nulă, datorită impedanțelor egale ale celor două linii paralele,

deci:

$$\underline{I}_1 - \underline{I}_2 = 0; \tag{2.15}$$

$$\underline{I}_1' - \underline{I}_2' = 0. \tag{2.16}$$

În cazul unui scurtcircuit pe una din linii, de exemplu în punctul K'' (fig. 2.3, *c*), impedanța porțiunii liniei *L-1* între stația *A* și punctul K'' este diferită de impedanța care intervine între barele *A* și punctul K'' pe calea formată de linia *L-2* și porțiunea liniei *L-1* dintre stația *B* și punctul defect; ca urmare rezultă:

$$\underline{I}_1'' \neq \underline{I}_2''; \; \underline{I}_1'' - \underline{I}_2'' \neq 0. \tag{2.17}$$

Din relațiile (2.15), (2.16) și (2.17) rezultă că protecțiile diferențiale transversale pot deosebi un scurtcircuit exterior de un scurtcircuit în zona protejată, selectivitatea fiind astfel asigurată.

Protecțiile diferențiale se realizează cu relee de curent sensibile.

În figurile 2.2 și 2.3 sînt notate prin săgeți sensurile convenționale ale curenților, conform celor menționate la protecțiile direcționale. Asemenea notații sînt folosite și în continuare.

5. Protecții de distanță

În cazul cel mai simplu, protecțiile de distanță controlează raportul valorilor efective ale tensiunii U și curentului I din punctul de instalare a protecției, acționînd în funcție de valoarea acestui raport, care reprezintă impedanța Z a circuitului protejat:

$$Z = \frac{U}{I}. \tag{2.18}$$

În cazul unui scurtcircuit, curentul I crește și tensiunea U scade, rezultînd o scădere importantă a impedanței Z; protecțiile de distanță sînt deci protecții minimale, condiția de acționare avînd un aspect analog cu cel din relația (2.6):

$$Z \leqslant Z_{pp}, \tag{2.19}$$

unde Z_{pp} este impedanța de pornire a protecției.

Protecțiile de distanță se realizează cu relee de impedanță, care au o bobină de curent și o bobină de tensiune (sau un circuit de curent și un circuit de tensiune, în cazul releelor electronice).

Valoarea impedanței Z controlată de protecție este proporțională — în anumite condiții — cu distanța dintre defect și locul de instalare a protecției. Astfel, de exemplu, în cazul unui scurtcircuit direct (fără arc) în punctul K_1 (fig. 2.4), la distanța l_1 de stația A, în care se găsește instalată protecția de distanță, curentul I prin linie are valoarea de scurtcircuit I_{sc}, deci:

$$I = I_{sc}, \tag{2.20}$$

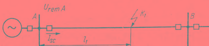


Fig. 2.4. Reprezentarea unui scurtcircuit pe linia protejată pentru ilustrarea funcționării protecțiilor de distanță.

iar tensiunea U (cu care este alimentată protecţia) este reprezentată de tensiunea remanentă $U_{rem\,A}$ la barele staţiei A, respectiv:

$$U = U_{rem\,A}. \qquad (2.21)$$

Întrucît defectul este direct şi tensiunea în punctul K_1 este nulă, tensiunea remanentă la barele staţiei A este egală cu căderea de tensiune determinată de circulaţia curentului I_{sc} prin porţiunea de linie dintre A şi K_1. Notînd cu z_s impedanţa specifică (pe unitatea de lungime) a liniei, impedanţa porţiunii de linie dintre A şi K_1 are valoarea $z_s l_1$, iar tensiunea $U_{rem\,A}$ — în ipoteza că este considerată tensiunea pe fază — are expresia:

$$U_{rem\,A} = I_{sc} z_s l_1. \qquad (2.22)$$

Înlocuind expresiile (2.20), (2.21) şi (2.22) în relaţia (2.18), se obţine:

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{U_{rem\,A}}{I_{sc}} = \frac{I_{sc} z_s l_1}{I_{sc}} = z_s l_1, \qquad (2.23)$$

ceea ce confirmă proporţionalitatea dintre impedanţa Z, controlată de protecţie, şi distanţa l_1 pînă la defect; denumirea protecţiilor de distanţă se datoreşte acestei proporţionalităţi.

6. Protecţii cu filtre

Multe defecte sînt însoţite de apariţia unor componente simetrice sau de apariţia unor armonici superioare: pe această bază au fost realizate protecţiile cu filtre de componente simetrice şi cele cu filtre de armonici superioare.

● **Filtrele de componente simetrice** sînt frecvent utilizate, întrucît marea majoritate a scurtcircuitelor (aproximativ 95%) sînt nesimetrice, deci sînt însoţite de apariţia componentelor de secvenţă inversă ale tensiunilor şi curenţilor, iar un procent ridicat de defecte (circa 85%) sînt însoţite şi de contact cu pămîntul , deci de apariţia componentelor de secvenţă homopolară ale tensiunilor şi curenţilor.

● **Filtrele de armonici superioare** au încă o utilizare relativ restrînsă în realizarea protecţiilor; folosirea lor se bazează pe prezenţa unor armonici superioare ale curentului în cazul anumitor defecte, cum sînt, de exemplu, punerile la pămînt monofazate.

7. Protecţii prin semnale de înaltă frecvenţă

Pentru protecţia liniilor de înaltă şi foarte înaltă tensiune se pot utiliza semnale de înaltă frecvenţă transmise între dispozitivele de protecţie de la cele două capete ale liniei protejate, ceea ce permite lichidarea rapidă a defectelor apărute pe întreaga lungime a liniei protejate.

Semnalele de înaltă frecvenţă pot fi transmise fie chiar printr-un conductor al liniei de înaltă tensiune, fie prin radio.

8. Protecţii termice

În cazul scurtcircuitelor şi al suprasarcinilor are loc creşterea temperaturii conductoarelor şi anumitor piese, ceea ce permite folosirea unor protecţii termice, acţionînd în funcţie de valoarea temperaturii pieselor respective. De regulă, protecţiile termice se folosesc pentru motoare electrice.

9. Protecţii cu relee de gaze

La transformatoarele în cuvă cu ulei, apariţia unui defect în bobinajele din interiorul cuvei determină degajarea unor gaze; pe această bază sînt realizate protecţiile cu relee de gaze pentru transformatoare.

D. PROTECŢII DE BAZĂ, DE REZERVĂ ŞI AUXILIARE

● **Protecţia de bază** a unei instalaţii electrice este protecţia destinată să lichideze rapid defectele apărute în instalaţia respectivă.

● **Protecţia de rezervă** a aceleiaşi instalaţii este protecţia destinată să asigure lichidarea defectelor în cazul în care a avut loc un refuz de funcţionare a protecţiei de bază sau în cazul cînd aceasta se găseşte în revizie. Protecţia de rezervă trebuie să acţioneze cu temporizare, pentru a da întîi posibilitatea protecţiei de bază să lichideze defectele, în cazul acţionării corecte a acestei protecţii.

Protecţia de rezervă a unei instalaţii poate fi reprezentată de o a doua protecţie a instalaţiei, care dublează protecţia de bază (în acest caz este folosită denumirea de *rezervă locală*), sau poate fi asigurată de o protecţie a unei instalaţii vecine (în acest caz fiind folosit termenul *rezervă de la distanţă*).

Aceasta din urmă comandă declanşarea întrerupătorului instalaţiei vecine şi scoaterea ei din funcţiune, dacă într-un anumit interval de timp defectul nu a fost lichidat de protecţia de bază a instalaţiei în care a apărut defectul. În consecinţă, spre deosebire de rezerva locală, rezerva de la distanţă asigură lichidarea defectelor şi în cazul cînd un întrerupător rămîne blocat (deşi protecţia de bază a transmis semnalul de declanşare), întrucît comandă declanşarea întrerupătorului instalaţiei vecine.

O soluţie intermediară între rezerva locală şi rezerva de la distanţă este reprezentată de rezerva prin întrerupător. În acest caz, în schema protecţiei unei instalaţii sînt incluse dispozitive suplimentare — denumite dispozitive de rezervă la refuzul întrerupătorului *DRRI* — care comandă (dacă într-un anumit interval de timp de la acţionarea protecţiei nu a avut loc declanşarea întrerupătorului instalaţiei, deci dacă acesta a avut un refuz de funcţionare) declanşarea unor întrerupătoare ale instalaţiilor vecine, racordate la aceleaşi bare colectoare.

● **Protecţia auxiliară** se instalează în cazul cînd protecţia de bază are zone moarte, respectiv nu poate asigura lichidarea defectelor pe întreaga lungime a instalaţiei protejate; rolul protecţiei auxiliare — de a lichida defectele apărute în zonele moarte ale protecţiei de bază — este îndeplinit uneori de protecţia de rezervă.

E. ALIMENTAREA SCHEMELOR DE PROTECŢIE

În schemele de protecţie este necesară o sursă de alimentare a anumitor relee — relee de timp, relee intermediare — şi a bobinelor de declanşare ale întrerupătoarelor (releele de curent, de tensiune şi direcţionale sînt alimentate de transformatoarele de curent şi de tensiune).

Curentul debitat de sursa menţionată, numit *curent operativ*, poate fi curent continuu sau curent alternativ.

● **Sursele de curent operativ continuu** sînt reprezentate de bateriile de acumulatoare, care au avantajul că prezintă un grad ridicat de siguranță, energia acumulată în baterii asigurînd continuitatea alimentării circuitelor protecției independent de regimul în care se găsește instalația protejată și sistemul electric în ansamblu (regim normal sau regim de avarie). Pe de altă parte, bateriile de acumulatoare au o serie de dezavantaje, cum ar fi: cost ridicat, necesitatea unei exploatări foarte îngrijite și relativ complicate, necesitatea unei rețele locale de curent operativ pentru alimentarea protecțiilor și a bobinelor de declanșare ale întrerupătoarelor.

Datorită dezavantajelor menționate, bateriile de acumulatoare sînt, de regulă, utilizate ca surse de curent operativ în centrale electrice și în stații electrice mari.

● **Sursele de curent operativ alternativ** sînt mai ieftine decît bateriile de acumulatoare și permit o simplificare a circuitelor de curent operativ și a exploatării lor. În prezent, sursele de curent operativ alternativ sînt utilizate de regulă în stații cu tensiunea pînă la 35 kV.

Există mai multe variante de alimentare cu curent operativ alternativ, dintre care pot fi menționate: alimentarea directă de la transformatoarele de curent, alimentarea de la transformatoarele de curent și de tensiune prin intermediul unui bloc de redresare cu diode semiconductoare, alimentarea cu energia înmagazinată în condensatoare încărcate în prealabil, printr-un dispozitiv de încărcare conectat la transformatoarele de tensiune.

În cadrul capitolelor destinate protecțiilor diferitelor instalații din sistemele electrice sînt descrise unele din variantele menționate.

La noi în țară se fabrică, la Institutul de cercetări și modernizări energetice (ICEMENERG), toate variantele prezentate de alimentare cu curent operativ alternativ.

Astfel, dispozitivul *DPCA* (dispozitiv de protecție în curent alternativ) folosește alimentarea directă de la transformatoarele de curent, dispozitivul *BACC* (bloc de alimentare cu curent continuu) utilizează alimentarea de la transformatoarele de curent și de tensiune, însă conține și elemente de stabilizare și de redresare, iar dispozitivul *DCA* (dispozitiv cu condensator în curent alternativ) funcționează cu ajutorul energiei înmagazinate într-un condensator încărcat în prealabil.

REZUMAT

● Principalele defecte care apar în sistemele electrice sînt scurtcircuitele (polifazate sau monofazate) și punerile la pămînt. Scurtcircuitele polifazate pot fi bifazate sau trifazate.

● Regimurile anormale cele mai frecvente sînt supraintensitățile (provocate de scurtcircuite exterioare sau de suprasarcini), scăderile de tensiune și pendulările.

● Condițiile impuse funcționării protecției prin relee sînt rapiditatea, selectivitatea, siguranța, sensibilitatea și independența față de regimul momentan de exploatare.

● Condițiile impuse realizării și construcției echipamentului de protecție sînt eficiența economică, gabarite reduse, tipizarea subansamblelor, invariabilitatea parametrilor.

● Principalele tipuri de protecţii prin relee sînt: protecţiile de curent, protecţiile de tensiune, protecţiile direcţionale, protecţiile diferenţiale (longitudinale şi transversale), protecţiile de distanţă, protecţiile cu filtre (de componente simetrice sau de armonici superioare), protecţiile prin semnale de înaltă frecvenţă, protecţiile termice şi protecţiile cu relee de gaze.

● După rolul pe care îl îndeplinesc, protecţiile prin relee se împart în protecţii de bază, protecţii de rezervă (rezervă locală, rezervă de la distanţă, rezervă prin întrerupător) şi protecţii auxiliare.

● Alimentarea schemelor de protecţie se poate face de la surse de curent operativ continuu (baterii de acumulatoare) sau de la surse de curent operativ alternativ sau redresat (transformatoare de curent, transformatoare de tensiune, condensatoare încărcate în prealabil de la transformatoare de tensiune).

VERIFICAREA CUNOŞTINŢELOR

1. Care sînt reţelele de înaltă tensiune în care străpungerea izolaţiei dintre o fază şi pămînt reprezintă un scurtcircuit monofazat?
   a) 6 kV?
   b) 20 kV?
   c) 110 kV şi mai mult?
2. Cum sînt neutrele transformatoarelor din reţelele în care un defect între o fază şi pămînt reprezintă un scurtcircuit monofazat?
   a) Legate la pămînt prin bobină de stingere?
   b) Legate direct la pămînt?
   c) Legate la pămînt prin rezistenţă?
3. În cazul căror defecte apar componentele de secvenţă homopolară?
   a) Scurtcircuite bifazate?
   b) Scurtcircuite trifazate?
   c) Scurtcircuite monofazate şi puneri la pămînt?
4. Cum se numeşte proprietatea protecţiei prin relee de a stabili care este instalaţia defectă şi a comanda numai deconectarea acestei instalaţii din ansamblul instalaţiilor sistemului electric?
   a) sensibilitate?
   b) selectivitate?
   c) siguranţă?
5. Care tip de protecţie controlează defazajul dintre curent şi tensiune?
   a) protecţia de curent?
   b) protecţia direcţională?
   c) protecţia de filtre?
6. Care tip de protecţie controlează o mărime proporţională (în anumite condiţii) cu impedanţa dintre locul defectului şi locul de instalare a protecţiei?
   a) protecţia direcţională?
   b) protecţia diferenţială?
   c) protecţia de distanţă?
7. Care protecţii acţionează cu cea mai mare rapiditate pentru lichidarea unui defect apărut în instalaţia protejată?
   a) protecţii de bază?
   b) protecţii de rezervă locale?
   c) protecţii de rezervă prin întrerupător?
8. Care sursă de alimentare a schemelor de protecţie asigură alimentarea circuitelor protecţiei independent de regimul (normal sau de avarie) în care se găseşte instalaţia protejată şi sistemul electric?
   a) bateriile de acumulatoare?
   b) transformatoarele de curent?
   c) transformatoarele de tensiune?

CAPITOLUL 3

CONSTRUCȚIA ȘI FUNCȚIONAREA RELEELOR CU CONTACTE

A. NOȚIUNI GENERALE

1. Introducere

În accepțiunea cea mai generală *releele* reprezintă elemente de automatizare la care mărimea de ieșire variază brusc (în salt) atunci cînd mărimea de intrare, variind în mod continuu, atinge o valoare prescrisă numită *valoare de acționare*.

Pentru exemplificare și în scopul definirii ulterioare a unor mărimi specifice releelor, în figura 3.1 s-a indicat într-o formă principială tipul cel mai reprezentativ de releu și anume *releul electromagnetic*. Structural, acesta cuprinde o armătură fixă F pe care este înfășurată bobina B parcursă de curentul de intrare I_i și o armătură mobilă M, prevăzută cu o punte de contact P și care este menținută într-o poziție îndepărtată (contactul C_1, deschis) datorită resortului antagonist A. Cînd curentul de intrare I_i este relativ mic armătura mobilă M este atrasă, însă resortul antagonist A se opune deplasării acesteia. Cînd curentul de intrare atinge o anumită valoare I_{ie} numită *valoare de excitare*, rezistența resortului este învinsă și armătura mobilă fiind atrasă produce închiderea contactului C_1. Se spune în acest caz că releul s-a *excitat*.

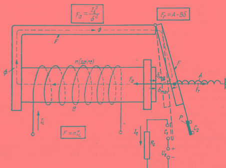


Fig. 3.1. Releu electromagnetic.

Ca urmare în circuitul de ieșire va lua naștere un curent de ieșire I_{e0} a cărui valoare depinde exclusiv de parametrii circuitului respectiv:

$$I_{e0} = \frac{U_e}{R_s}, \quad (3.1)$$

în care prin R_s s-a notat *rezistența de sarcină* din circuitul de ieșire.

Deci excitarea releului poate fi definită prin următoarele relații simple (fig. 3.2):

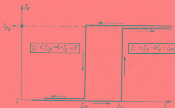


Fig. 3.2. Caracteristica de funcționare a releului.

$I_i < I_{ie} \Rightarrow$ releu dezexcitat $\Rightarrow C_1 =$ deschis $\Rightarrow I_e = 0$;
$I_i \geqslant I_{ie} \Rightarrow$ releu excitat $\Rightarrow C_1 =$ închis $\Rightarrow I_e = I_{e0}$.

Observație. Oricît de mult ar crește curentul I_i peste valoarea de excitație curentul I_e rămîne la aceeași valoare constantă ($I_e = I_{e0}$).

La scăderea curentului I_i armătura mobilă nu este eliberată chiar dacă curentul respectiv scade puțin sub valoarea I_{ie}*.

La o anumită valoare a curentului $I_i = I_{id}$ numită *valoare de dezexcitare* care este mai mică decît cea de excitare ($I_{id} < I_{ie}$) armătura M se desprinde, contactul C_1 se deschide, deci I_e devine nul.

Deci dezexcitarea releului poate fi definită astfel (fig. 3.2)

$I_i > I_{id} \Rightarrow$ releu excitat $\Rightarrow C_1$ închis $\Rightarrow I_e = I_{e0}$
$I_i \leqslant I_{id} \Rightarrow$ releu dezexcitat $\Rightarrow C_1$ deschis $\Rightarrow I_e = 0$.

Contactul C_1, care este deschis în starea dezexcitată a releului (starea normală) se numește *contact normal deschis*.

În figura 3.1 s-a prevăzut ca exemplu și un contact C_2 care este *închis* în starea dezexcitată a releului, fapt pentru care se numește *contact normal închis*.

Dacă cele două contacte C_1 și C_2 au o bornă comună de legare ele constituie împreună un contact *comutator*. Uneori releele sînt prevăzute cu contacte *alunecătoare (pasagere)* adică contacte care sînt, de exemplu, deschise, în ambele stări ale releului, însă se închid pentru un scurt timp în trecerea („pasager") de la o stare la alta *(contact alunecător normal deschis)*. Similar, se poate folosi un *contact alunecător normal închis*, adică închis în ambele stări ale releului și care se deschide *pasager*.

Pe baza celor arătate, se poate conchide că, din punctul de vedere al comportării sale, un releu constituie un element la care mărimea de intrare variază *continuu (analogic)*, în timp ce mărimea de ieșire variază *discontinuu* sau *discret* (logic) căpătînd numai două valori posibile cărora le putem asocia semnele logice 0 sau 1 ($I_e = 0$ sau $I_e = I_{e0} = 1$). Datorită acestui mod de comportare, în automatică se spune că releul este un element *analogo-logic* sau *hibrid*

---

* Armătura fiind atrasă, deci întrefierul devenind practic nul, reluctanța magnetică (R) a circuitului scade față de starea inițială, fapt care reclamă un curent (I_i) mai mic care să asigure același flux magnetic (Φ) deci să permită menținerea atrasă a armăturii $\left(\Phi = \frac{nI_i}{\mathcal{R}}\right)$.

Numărul mare de tipuri și domeniile vaste de aplicare face dificilă o clasificare cuprinzătoare a releelor. În cele ce urmează se va face o clasificare pe baza diverselor criterii de definire.

● **Din punctul de vedere al naturii mărimii de intrare** releele se clasifică în două grupe mari:

— *relee de mărimi electrice*, de exemplu: — de curent, de tensiune, de frecvență, de putere, de impedanță etc.;

— *relee de mărimi neelectrice*, de exemplu: — de presiune, de temperatură, mecanice, de debit etc.

Observație. La toate tipurile de relee, inclusiv la cele de mărimi neelectrice (care sînt prevăzute la ieșire cu contacte electrice) mărimea de ieșire este întotdeauna de natură electrică.

● **În funcție de modul de realizare al saltului** în circuitul de ieșire releele se împart în două grupe structural distincte:

— *relee cu contacte* ce vor fi prezentate în continuare în acest capitol;

— *relee fără contacte* (statice) ce vor fi prezentate în capitolul următor.

● **După sensul de variație al mărimii de intrare în momentul acționării,** releele se clasifică în:

— *relee maximale* (de maximum) a căror acționare se produce atunci cînd mărimea de intrare (de exemplu curentul) depășește o anumită valoare maximă;

— *relee minimale* (de minimum) a căror acționare se produce atunci cînd mărimea de intrare (de exemplu tensiunea) scade sub o valoare minimă;

Observație. Din figurile 3.1 și 3.2 se constată, de exemplu, că dacă releul electromagnetic respectiv este folosit ca *element maximal*, el *acționează prin excitare*, iar dacă este folosit ca *element minimal*, acționează prin *dezexcitare*.

Evident, este posibil ca același releu să fie folosit simultan ca element *maximal și minimal*. De exemplu, manometrul cu contacte reprezintă un releu de presiune avînd contacte de maximă și de minimă presiune ce pot fi reglate independent;

— *relee direcționale* (de sens) a căror acționare se produce atunci cînd mărimea de intrare (de exemplu puterea) are un anumit sens de circulație (pozitiv sau negativ).

● **Din punctul de vedere al principiului de funcționare** releele de mărimi electrice se împart în următoarele categorii: *electromagnetice* (fig. 3.1), *magnetoelectrice, electrodinamice, de inducție, electrotermice* etc.

● Deși realizate pe aceleași principii de funcționare releele au fost construite în mod special pentru diverse domenii ale tehnicii, fapt care impune o clasificare specifică, astfel:

— relee de protecție;

— relee de automatizare;

— relee telefonice etc.

Observație. Deși protecția prin relee aparține domeniului automaticii, ea a luat ființă și s-a dezvoltat cu mult timp înaintea altor tipuri de sisteme automate, motiv pentru care releele de protecție constituie o categorie aparte.

● **Din punctul de vedere al mărimii intervalului de timp între momentul atingerii valorii de acționare și momentul basculării* releului** se disting următoarele tipuri de relee:

— *relee instantanee,* la care intervalul de timp considerat este practic nul;

— *relee temporizate,* la care acest interval de timp este realizat intenționat la o anumită valoare (de exemplu 0,5—10 s).

Aceste tipuri de relee sînt realizate cu ajutorul unor *dispozitive de temporizare* (mecanice, electrice, magnetice, pneumatice etc.) ce vor fi prezentate în cadrul acestui capitol.

3. Caracteristicile releelor

Mărimile care caracterizează un anumit releu sînt, în principal, următoarele:

● **Natura fizică și parametrii mărimii de intrare (de excitare).** De exemplu: releu de curent 2,5—10 A, c.a.

● **Puterea absorbită la intrare** pentru ca releul să acționeze. Această putere variază de obicei între 0,5 și 30 W.

● **Curentul (puterea) admis de contacte în circuitul de ieșire.**

Se deosebește:

— *curentul de închidere* (de exemplu 10 A) adică curentul maxim pe care contactul poate să-l stabilească în circuit fără a se deteriora;

— *curentul de durată* (de exemplu 5 A), care este curentul maxim admisibil ce poate străbate contactul în stare închisă un timp nelimitat;

— *curentul de rupere* (de exemplu 2 A) care este curentul maxim admisibil pe care contactul poate să-l întrerupă în circuitul de ieșire.

Dintre aceste caracteristici cea mai mare atenție se acordă *curentului* (puterii) *de rupere* a contactului numit uneori și *curent* (putere) *de comutare.* Pentru un anumit contact curentul de rupere este dictat de natura tensiunii și a circuitului în care se produce comutarea, adică de *factori externi* releului. Deschiderea unui circuit alimentat în curent continuu este mai dificilă decît a unui circuit în curent alternativ la care trecerea periodică a curentului prin valoarea zero favorizează procesul de stingere a arcului format la deschiderea contactului.

Circuitele inductive prezintă dificultăți la întrerupere datorită energiei magnetice înmagazinată în inductanță (bobină) care datorită tensiunilor electromotoare de autoinducție tind să mențină un arc electric pe contact și după deschiderea acestuia. În schimb, datorită aceluiași fenomen, închiderea unui circuit inductiv este mai ușoară decît, de exemplu, un circuit rezistiv la care valoarea permanentă de regim se stabilește în momentul inițial.

Circuitele capacitive și în mod analog cele cu lămpi cu incandescență** prezintă dificultăți la închiderea contactelor cînd curentul absorbit este mult mai mare decît în regim permanent.

---

* Prin *basculare* se înțelege schimbarea poziției releului adică din dezexcitat — excitat sau invers.

** După cum se știe, rezistența unei lămpi cu incandescență este de circa 10 ori mai mică în stare rece decît după ce a fost alimentată.

În concluzie, în cataloagele de relee se specifică, de exemplu, că un contact poate rupe cel mult 2 A la maximum 200 V curent continuu, sau 3 A la maximum 220 V curent alternativ pe o sarcină rezistivă şi respectiv 1,5 A, c.c. sau 2 A c.a. pe o sarcină inductivă.

● **Factorul de revenire.** După ce un releu a acţionat la o anumită valoare a mărimii de intrare, el poate reveni în starea iniţială la o altă valoare a mărimii de intrare numită *valoare de revenire*. După cum a rezultat din exemplul din figura 3.2, valoarea de revenire (dezexcitare) I_{id} este diferită de cea de acţionare (excitare) I_{ie}.

Raportul dintre valoarea de revenire (X_r) şi cea de acţionare (X_a) a mărimii de intrare se numeşte *factor* sau *coeficient de revenire* (K_r):

$$K_{rev} = \frac{X_r}{X_a}. \tag{3.2}$$

Considerînd, de exemplu, un releu maximal de curent cu un contact normal deschis a cărui caracteristică de funcţionare este prezentată în figura 3.3, *a*) şi admiţînd că acesta se află permanent sub curentul nominal $I_n = 5$ A, se excită la $I_{ie} = 10$ A şi se dezexcită la $I_{id} = 8$ A, se pot constata următoarele:

Releul fiind maximal va acţiona (la creşterea curentului) prin excitare şi va reveni (la scăderea curentului) prin dezexcitare. Ca urmare, ţinînd seamă de relaţia (3.2) se poate scrie expresia factorului de revenire pentru releele maximale:

$$K_{rev\,(max)} = \frac{I_{id}}{I_{ie}} < 1. \tag{3.3}$$

În concluzie *factorul de revenire al releelor maximale este subunitar*.

Considerînd similar un releu minimal de tensiune cu un contact normal închis (fig. 3.3, *b*) şi admiţînd că acesta se află permanent sub tensiunea nominală $U_n = 100$ V, se dezexcită la $U_{id} = 48$ V şi se excită la $U_{ie} = 60$ V (contactul său normal închis este deschis în funcţionarea normală a instalaţiei) se pot constata următoarele:

Releul fiind minimal va acţiona (la scăderea tensiunii) prin dezexcitare şi va reveni (la creşterea — revenirea — tensiunii) prin excitare. Ca urmare,

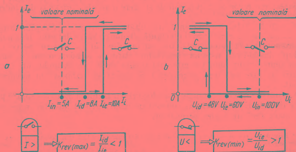


Fig. 3.3. Caracteristica de definire a factorului de revenire:
a — la releele maximale; *b* — la releele minimale.

ţinînd seamă de relaţia (3.2) se poate scrie expresia factorului de revenire pentru releele minimale:

$$K_{rev\,(min)} = \frac{U_{ie}}{U_{id}} > 1. \qquad (3.4)$$

În concluzie, *factorul de revenire al releelor minimale este supraunitar.*

● **Numărul de acţionări ale releului** fără ca acesta să se defecteze. De exemplu fabricile constructoare garantează pentru un releu un număr de 1 000—1 000 000 acţionări indicînd frecvenţa de acţionare precum şi sarcinile admisibile.

De exemplu pentru releul de timp românesc *RTp*-7 se specifică în prospect:

— numărul maxim de acţionări electrice:

1 000 acţionări la un curent de rupere de 3 A, cos φ = 0,4, 220 V, c.a., cu frecvenţa de 10 acţionări pe oră;

10 000 acţionări la un curent de rupere de 2 A, cos φ = 0,4, 220 V c.a., cu 20 acţionări pe oră;

100 000 acţionări la 1 A, cos φ = 0,4, 220 V c.a., cu 50 acţionări pe oră;

— numărul maxim de acţionări mecanice (curentul pe contacte neglijabil): 1 000 000 acţionări cu frecvenţa de 1 000 acţionări pe oră.

În practică, acest număr este incomparabil mai mic, revizia releelor făcîndu-se la anumite intervale de timp.

● **Numărul, tipul şi poziţia contactelor.** Contactele pot fi: instantanee (netemporizate), adică îşi schimbă practic poziţia în momentul acţionării releului, sau *temporizate*, adică îşi schimbă poziţia după un timp prestabilit.

Observaţie. Releele temporizate pot avea pe lîngă contactele lor temporizate şi anumite contacte cu acţiune instantanee. De exemplu, un releu temporizat poate avea două contacte instantanee comutatoare, un contact normal deschis alunecător temporizat şi un contact normal deschis temporizat (la închidere).

● **Precizia de acţionare** reprezintă o caracteristică a releelor cu funcţie de măsurare (control), relee folosite în principal în protecţia prin relee.

Precizia unui releu reprezintă diferenţa dintre valoarea X_a a parametrului electric la care se produce acţionarea şi valoarea X_r a parametrului la care este reglat releul să acţioneze:

$$p = X_a - X_r. \qquad (3.5)$$

Precizia se exprimă, de obicei, în procente din valoarea reglată:

$$p = \frac{X_a - X_r}{X_r} \cdot 100\,[\%] \qquad (3.6)$$

De exemplu, un releu maximal de curent reglat la 10 A care acţionează la 10,2 A are o precizie de acţionare:

$$p = \frac{10{,}2 - 10}{10} \cdot 100 = 2\%.$$

4. Funcţiile releelor

Independent de domeniul în care se folosesc, funcţiile obişnuite ale releelor de diverse tipuri sînt următoarele:

● **Funcţia de măsurare sau control** se întîlneşte în special la releele de protecţie (de exemplu: releul maximal de curent, releul minimal de tensiune,

releul de impedanță, releul direcțional etc.) acestea avînd rolul de a controla anumiți parametri (curent, tensiune, impedanță etc.).

Se precizează că *a controla* înseamnă a măsura în permanență un anumit parametru în scopul sesizării faptului că parametrul respectiv a atins o anumită valoare. Această valoare se numește *valoare de reglare* sau *de consemn* a releului.

Releele cu funcții de măsurare se caracterizează prin precizie bună și consum redus de putere.

Observație. În schemele de protecție prin relee, releele cu funcții de măsurare sînt în principal acelea care se leagă la transformatoarele de curent și de tensiune.

Ca relee cu funcții de măsurare industria românească (Întreprinderea Electromagnetica) fabrică următoarele tipuri de relee:

RC-2 — releu maximal de curent;
RT-3 — releu maximal de tensiune;
RT-4 — releu minimal de tensiune etc.

● **Funcția de amplificare** (în putere) care permite să se alimenteze un circuit electric ce necesită un curent (putere) mai mare cu ajutorul unui curent (putere) relativ mai mic. De exemplu un releu intermediar absoarbe la excitare un curent de 15 mA (~3,3 W) și comandă prin contactul său un circuit care necesită 5 A (~ 1 000 W). La Întreprinderea Electromagnetica se fabrică relee intermediare de tipurile: *RI-3*; *RI-4*; *RI-5*; *RI-7*; *RI-8*; *RI-9*; *RI-10*; *RI-13* etc.

● **Funcția de multiplicare a numărului de circuite comandate de la un singur circuit** se realizează datorită faptului că un releu posedînd mai multe contacte poate asigura închiderea (deschiderea) mai multor circuite independente. Această funcție se întîlnește în special la releele intermediare (tipurile românești *RI*).

● **Funcția de temporizare** permite, așa cum s-a arătat anterior, o întîrziere între momentul aplicării unui impuls (excitarea releului) și momentul închiderii contactelor. Această funcție se întîlnește la releele de timp.

Industria românească fabrică relee de timp de tipurile *RTp-4*, RT_pa*-5* și *RTp-7*.

● **Funcția de semnalizare** se realizează cu ajutorul unor relee speciale, de semnalizare, numite uneori și *relee clapetă* și este materializată printr-o indicație optică sau (și) acustică atunci cînd într-un circuit apare un curent (clapete tip serie) sau o tensiune (clapete tip derivație).

Releele românești de semnalizare sînt tipurile *RdS-2* și *RdS-3*.

În cele ce urmează vor fi prezentate diverse tipuri de relee electrice, clasificate pe baza principiului lor de funcționare precum și unele tipuri de relee de mărimi neelectrice care se întîlnesc în instalațiile electroenergetice.

B. RELEE ELECTROMAGNETICE

1. Releul electromagnetic neutru

În figura 3.1 a fost prezentat ca exemplu și într-o formă principială un releu electromagnetic. Cînd bobina de excitare *B* avînd un număr de spire *n* este parcursă de curentul I_e ea dă naștere în miezul magnetic la o tensiune magnetomotoare $\mathcal{F}$:

$$\mathcal{F} = n \cdot I_e. \tag{3.7}$$

Fluxul magnetic Φ ce străbate miezul magnetic și se închide, bineînțeles prin întrefier, este determinat de relația:

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}, \tag{3.8}$$

în care $\mathcal{R}$ este reluctanța totală a circuitului magnetic și este dată de expresia:

$$\mathcal{R} = \Sigma \frac{l_f}{\mu_f \cdot S_f} + \frac{\delta}{\mu_a \cdot S_a} \tag{3.9}$$

în care:

l_f, μ_f, S_f — lungimea, permeabilitatea magnetică și secțiunea fierului în diversele tronsoane ale miezului magnetic*;

δ, μ_a, S_a — lungimea, permeabilitatea magnetică în aer și respectiv secțiunea întrefierului.

Deși lungimea liniilor de forță magnetice este mai mare în fier decît în aer ($\Sigma l_f > \delta$) totuși, deoarece permeabilitatea magnetică în fier este incomparabil mai mare decît cea în aer ($\mu_f \gg \mu_a$) primul termen al relației (3.9) poate fi neglijat, astfel că această relație capătă forma:

$$\mathcal{R} = \frac{\delta}{\mu_a S_a}. \tag{3.10}$$

În aceste condiții înlocuind (3.7) și (3.10) în (3.8) se obține expresia fluxului magnetic ce străbate releul:

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = \frac{nI_i}{\delta} \mu_a \cdot S_a = K_1 \cdot \frac{I_i}{\delta}, \tag{3.11}$$

în care $K_1 = n \cdot \mu_a \cdot S_a$ reprezintă o constantă de proporționalitate. După cum se cunoaște din electrotehnică, forța electromagnetică F_a, ce se manifestă într-un întrefier străbătut de fluxul magnetic Φ este proporțională cu pătratul mărimii respective:

$$F_a = K_2 \cdot \Phi^2, \tag{3.12}$$

sau ținînd seamă de (3.11) rezultă:

$$F_a = K_2 \cdot K_1^2 \cdot \frac{I_i^2}{\delta^2} = K_3 \cdot \frac{I_i^2}{\delta^2} \tag{3.13}$$

în care s-a notat $K_3 = K_2 \cdot K_1^2$.

Reprezentarea grafică a relației (3.13) într-un plan $F_a = f_a(\delta)$ pentru diverse valori I_{i1}, I_{i2}, I_{i3} ... ale curentului $I_i (I_{i1} < I_{i2} < I_{i3} \ldots)$ definește o serie de hiperbole (fig. 3.4) care se depărtează de origine pe măsura creșterii curentului I_i. În figura 3.4 s-a notat prin δ_{max} și δ_{min} valorile ma-

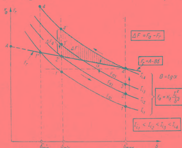


Fig. 3.4. Caracteristicile $F_a = f(\delta)$ și $F_r = f(\delta)$ la releul electromagnetic.

* Corespunzătoare diverselor secțiuni ale miezului în care inducția B variind $\left(B = \frac{\Phi}{S}\right)$ se modifică și permeabilitatea magnetică respectivă.

xime și minime ale întrefierului în poziția dezexcitat (armătura liberă) respectiv excitat (armătura atrasă) a releului.

Pe de altă parte resortul antagonist A (fig. 3.1) produce o forță rezistentă F_r opusă forței F_a.

Observație. Pentru simplificarea expunerii s-a presupus că cele două forțe activă F_a și rezistentă F_r acționează asupra armăturii mobile M în același punct. În realitate însă resortul antagonist poate fi amplasat în diverse puncte, astfel că acționarea releului are loc pe baza egalizării unor cupluri mecanice.

Forța F_r, fiind dată de un resort, va varia liniar cu alungirea astfel că va fi definită de o relație de forma:

$$F_r = A - B \cdot \delta \qquad (3.14)$$

și va fi reprezentată în planul $F_r - \delta$ de o dreaptă (fig. 3.4) avînd panta $-B$, iar ordonata la origine egală cu A.

Excitarea releului explicată pe baza diagramei din figura 3.4 are loc în felul următor:

— în poziția dezexcitată întrefierul are valoarea δ_{max} și la valorile I_{i1}, I_{i2} și I_{i3} (punctele *1*, *2* și *3*) deoarece $F_a < F_r$ armătura nu este atrasă;

— pentru $I_i \geqslant I_{i4}$ (punctul *4*) este îndeplinită condiția $F_a = F_{a4} \geqslant F_r$ și armătura releului este atrasă pînă la valoarea δ_{min} a întrefierului (punctul *4'*).

Observație. Deoarece în intervalul de excitare $(\delta_{max} \ldots \delta_{min})$ F_{a4} variază mai repede (hiperbolă) decît F_r (dreaptă), apare o forță de accelerare ΔF a armăturii mobile:

$$\Delta F = F_{a4} - F_r, \qquad (3.15)$$

care nu permite armăturii să se oprească într-o poziție intermediară ci numai la sfîrșitul cursei ($\delta = \delta_{min}$); pe de altă parte forța ΔF asigură apăsarea pe contacte.

Dezexcitarea releului explicată pe baza aceleiași diagrame are loc astfel:

— la scăderea curentului prin bobină la valoarea I_{i3} (punctul *3'*) deoarece $F_{a3} > F_r$ armătura continuă să fie atrasă;

— pentru $I_i \leqslant I_{i2}$ (punctul *2'*) este îndeplinită condiția $F_a = F_{a2} \leqslant F_r$ și armătura releului este eliberată pînă la valoarea δ_{max} a întrefierului (punctul *2*).

Observație. Similar se constată că apare o forță de accelerare ΔF în sens invers:

$$\Delta F = F_r - F_{a2} \qquad (3.16)$$

care face ca armătura să nu se oprească pe parcurs, ci numai în punctul *2*. Se observă că unui ciclu de funcționare a releului corespunde în diagrama din figura 3.4 unui ciclu închis determinat de punctele *2—4—4'—2'—2*. Din aceeași diagramă se observă și următoarele:

— pentru valorile lui I_i cuprinse între curentul de excitare I_{i4} și cel de dezexcitare I_{i2} ($I_{i2} \ldots I_{i4}$) de exemplu pentru I_{i3} armătura poate fi atrasă sau neatrasă corespunzător poziției anterioare;

— deoarece $I_{i2} < I_{i4}$ rezultă rațiunea pentru care factorul de revenire este diferit de valoarea 1;

— dacă pentru un δ_{max} dat se consideră $\delta'_{min} < \delta_{min}$ punctul *4'* se deplasează în *4''* deci dezexcitarea are loc pentru un curent $I_{i1} < I_{i2}$ (punctul *1''*), ceea ce are ca efect înrăutățirea factorului de revenire (scade la releele maximale și crește la cele minimale).

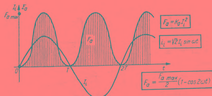


Fig. 3.5. Variația în timp a forței de atracție a releului electromagnetic în curent alternativ.

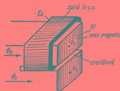


Fig. 3.6. Eliminarea vibrațiilor la releul electromagnetic de curent alternativ.

Același efect se obține prin sporirea întrefierului maxim, modificarea intervalului de variație a întrefierului ($\Delta\delta = \delta_{max} - \delta_{min}$) constituind o metodă de reglare a factorului de revenire.

Din relația (3.13) se constată că deoarece forța de atragere variază proporțional cu pătratul curentului (I_i^2) ce străbate bobina, această forță își păstrează sensul de atragere independent de sensul curentului I_i. Ca urmare, releul descris funcționează atît în curent continuu cît și în curent alternativ, motiv pentru care el se mai numește și *releu electromagnetic neutru*.

Trebuie remarcat faptul că în curent alternativ forța de atragere F_a va trece prin zero simultan cu trecerile prin zero ale curentului I_i (fig. 3.5). Datorită inerției mecanice armătura mobilă rămîne atrasă, însă produce o vibrație și un bîzîit specific. Acest neajuns poate fi eliminat prin realizarea unei spire în scurtcircuit pe o parte din miezul magnetic fix (fig. 3.6). Fluxurile Φ_1 și Φ_2 care străbat cele două secțiuni ale întrefierului fiind defazate în acest caz *, forța de atragere nu va mai trece niciodată prin zero.

Releele electromagnetice de tipul celor descrise sînt cele mai răspîndite, fiind folosite ca relee cu funcții de măsurare — relee de curent *RC-2*, de tensiune *RT-3* și *RT-4* — cu funcții de amplificare — relee intermediare *RI-3*... *RI-13*, cu funcții de semnalizare — relee clapete *RdS-2* și *RdS-3*, cu funcții de temporizare — releul *RTpa-5* etc.

2. Releul polarizat

Este tot un releu electromagnetic de o structură specială realizabilă în diverse variante constructive (fig. 3.7) folosit numai în curent continuu. În toate variantele (fig. 3.7, *a*, *b*, *c*) releul polarizat cuprinde ca și releul electromagnetic neutru o armătură fixă *F* prevăzută cu un magnet permanent *N-S*, o armătură mobilă *M* avînd două întrefieruri de valorile δ_1 și δ_2 și o bobină *B* parcursă de curentul I_i. Magnetul permanent produce fluxul permanent Φ_p care are, de exemplu, sensul de circulație din figura 3.7, *a* (releul polarizat cu magnet în formă de potcoavă). Dacă curentul de intrare I_i are sensul (polaritatea) din figură, el va produce un flux magnetic Φ_i care se ramifică prin cele

* Datorită curentului indus în spira în scurtcircuit acesta produce un flux suplimentar de reacție care modifică faza fluxului Φ_1 în raport cu Φ_2.

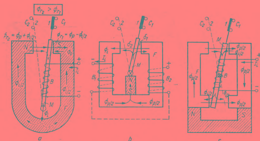


Fig. 3.7. Relee polarizate:
a – cu magnet în formă de potcoavă; *b* – cu un pol al magnetului bifurcat; *c* – cu circuit magnetic în punte.

două coloane laterale. În consecință, în întrefierul de valoarea δ_2 cele două fluxuri magnetice se vor scădea, deci fluxul rezultant va avea o valoare Φ_{r1}:

$$\Phi_{r1} = \Phi_p - \frac{\Phi_i}{2}, \tag{3.17}$$

iar în întrefierul de valoarea δ_1 cele două fluxuri se vor însuma și va rezulta un flux Φ_{r2}:

$$\Phi_{r2} = \Phi_p + \frac{\Phi_i}{2}. \tag{3.18}$$

Deoarece:

$$\Phi_{r1} < \Phi_{r2}, \tag{3.19}$$

în cele două întrefieruri vor rezulta forțele de atracție $F_{a1} < F_{a2}$, care vor plasa armătura mobilă pe poziția *2* închizînd contactul C_2.

Dacă polaritatea curentului în bobină este inversă celei din figură, fluxul Φ_i își modifică semnul. Ca urmare, relațiile (3.17) și (3.18) devin:

$$\Phi_{r1} = \Phi_p + \frac{\Phi_i}{2} \tag{3.20}$$

și

$$\Phi_{r2} = \Phi_p - \frac{\Phi_i}{2}, \tag{3.21}$$

deci

$$\Phi_{r1} > \Phi_{r2}, \tag{3.22}$$

deci forțele de atracție din întrefierurile $F_{a1} > F_{a2}$ vor plasa armătura mobilă pe poziția *1* închizînd contactul C_1.

O funcționare identică o au și releele polarizate indicate în figura 3.7, *b* (releu polarizat cu un pol al magnetului bifurcat), și în figura 3.7, *c* (releu polarizat cu circuit magnetic în punte).

Observație. Releul polarizat din figura 3.7, *b* avînd două bobine B_1 și B_2, poate fi folosit ca releu diferențial, adică poate fi făcut să reacționeze la semnul diferenței curenților în cele două bobine.

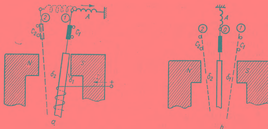


Fig. 3.8. Relee polarizate speciale:
a — monostabil — bipozițional; *b* — monostabil — tripozițional.

Releele polarizate descrise mai sus pot fi folosite ca relee cu două poziții (bipoziționale), armătura lor rămînînd în poziția corespunzătoare polarității de excitare anterioară, adică ambele poziții sînt stabile (bistabile), față de releele neutre care sînt bipoziționale însă monostabile (poziția releu dezexcitat). Printr-o construcție specială (de exemplu, prevăzîndu-i-se un resort antagonist *A* ca în figura 3.8, *a*), releului polarizat i se poate da o anumită poziție stabilă, de exemplu poziția *1* cînd se închide contactul C_1. El își schimbă poziția numai la un anumit sens al curentului (cînd se închide contactul C_2) și revine în poziția stabilă la dezexcitare; pentru un curent de sens invers releul este insensibil. Acesta este deci un releu *polarizat, monostabil, bipozițional*. În sfîrșit, dacă releul este prevăzut cu un resort antagonist *A* ca în figura 3.8, *b*, care menține armătura mobilă într-o poziție mediană (poziția 0) se constată că, în conformitate cu cele arătate mai sus, releul polarizat a devenit *monostabil* (poziția 0), *tripozițional* (pozițiile 0, *1* și *2*).

Releele polarizate prezintă o sensibilitate mare, acționînd la tensiuni magnetomotoare de 2—10 ASp, respectiv la puteri de 1—5 mW. Timpul de acționare este de ordinul 1—5 ms. Releele polarizate se întîlnesc în special în structura releelor complexe de protecție (direcționale, de distanță etc.).

C. RELEE MAGNETOMOTOARE

Aceste tipuri de relee se construiesc pe principiul aparatelor de măsură magnetoelectrice (fig. 3.9), adică pe baza acțiunii cuplului ce se exercită asupra unei bobine *B* plasată pe un cadru mobil *M* parcursă de curentul I_i de către cîmpul magnetic al unui magnet permanent *N*—*S*.

La trecerea curentului I_i prin bobină cadrul mobil se rotește antrenînd pîrghia *P* în sensul pozitiv (+) sau negativ (—) în funcție de polaritatea curentului, închizînd contactul C_1 eventual C_2.

În practică, de exemplu în structura releului de distanță *RD-7* se folosesc relee magnetoelectrice avînd două bobine plasate pe același cadru mobil și parcurse de curenți diferiți. Releul acționează nu pe baza valorilor absolute ale celor doi curenți ci în funcție de semnul raportului lor. Din această cauză acest tip de releu se mai numește și *releu balanță*.

D. RELEE ELECTRODINAMICE

Principial, acestea sînt asemănătoare releelor magnetoelectrice, cu observația că în afara bobinei B_1 plasată pe cadrul mobil M și străbătută de curentul I_{i1} (fig. 3.10) există o a doua bobină B_2 plasată pe miezul magnetic fix F și străbătută de curentul I_{i2} care produce un cîmp magnetic echivalent cîmpului magnetic permanent din cazul precedent.

Cuplul de rotație C_a are o valoare proporțională cu produsul celor doi curenți:

$$C_a = K \cdot I_{i1} \cdot I_{i2}, \tag{3.23}$$

și va fi pozitiv sau negativ asigurînd închiderea contactelor C_1 respectiv C_2 în funcție de polaritatea curenților.

Releele electrodinamice se construiesc atît pentru curent continuu cît și pentru curent alternativ.

Dacă cele două bobine sînt legate în serie, cuplul de rotație al echipajului mobil va fi:

$$C_a = K \cdot I_i^2, \tag{3.24}$$

deci releul va avea același sens de rotire independent de sensul curentului de excitare. Ca urmare, în aceste condiții releul poate fi folosit și în curent alternativ.

Dacă cele două bobine sînt alimentate cu doi curenți alternativi I_{i1} și I_{i2} avînd între ei un unghi de defazaj φ, cuplul activ capătă forma:

$$C_a = K \cdot I_{i1} \cdot I_{i2} \cos \varphi. \tag{3.25}$$

În sfîrșit, dacă cei doi curenți sînt proporționali cu tensiunea U respectiv cu curentul I aferenți unui circuit (de exemplu o linie electrică):

$$I_{i1} = K_1 \cdot U \quad \text{și} \quad I_{i2} = K_2 \cdot I. \tag{3.26}$$

expresia cuplului de rotire devine:

$$C_a = K \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = K_p \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = K_p \cdot P, \tag{3.27}$$

în care s-a notat:

$$K_p = K \cdot K_1 \cdot K_2;$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi.$$

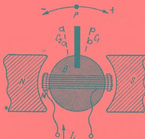


Fig. 3.9. Releu magnetoelectric.

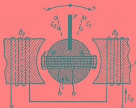


Fig. 3.10. Releu electrodinamic.

Deci releul reacționează pe baza sensului (direcției de circulație) al puterii active P prin circuitul respectiv. S-a obținut astfel un *releu direcțional de putere activă.*

Constructiv, asemenea tipuri de relee se realizează pentru un cuplu activ dat de expresia:

$$C_a = K_p \cdot U \cdot I \cos(\varphi + \alpha), \qquad (3.28)$$

în care α depinde de caracteristicile constructive și se numește *unghi interior al releului.*

Pentru $\alpha = 0$ se obține un releu direcțional de putere activă iar pentru $\alpha = \frac{\pi}{2}$ relația (3.28) devine:

$$C_a = K_p \cdot U \cdot I \cdot \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) = K_p \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi = K_p Q \qquad (3.29)$$

în care s-a notat: $Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$ puterea reactivă aplicată releului.

În acest caz s-a obținut un *releu direcțional de putere reactivă.*

E. RELEE DE INDUCȚIE

Releele de inducție se realizează pe principiul aparatelor de măsură de inducție (contoare) adică pe baza interacțiunii între două fluxuri magnetice alternative și a curenților reciproci induși de aceste fluxuri într-un rotor, disc sau tambur (pahar) din aluminiu.

1. Relee de inducție cu o înfășurare

Aceste tipuri de relee se folosesc atunci cînd este necesar ca mișcarea rotorului să fie funcție de o singură mărime electrică — curent sau tensiune.

Principial releul cuprinde o bobină B pe un miez magnetic fix F în întrefierul căruia se poate roti discul D (fig. 3.11, *a*).

Deoarece pe o porțiune a polilor magnetici ai miezului, în zona întrefierului se prevăd spirele de cupru în scurtcircuit S, fluxul magnetic Φ produs de curentul I_i se ramifică în două fluxuri Φ_1 și Φ_2 decalate în spațiu; Φ_2 este în fază cu Φ iar Φ_1, defazat în timp cu unghiul α față de Φ_2, deci față

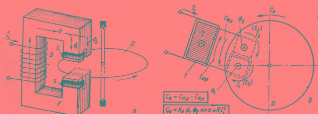


Fig. 3.11. Releu de inducție cu o înfășurare:
a — vedere în perspectivă; *b* — vedere de sus.

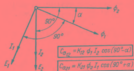


Fig. 3.12. Diagrama mărimilor electrice la releul de inducție cu o înfășurare.

de Φ (fig. 3.12). Cele două fluxuri induc în discul de aluminiu două tensiuni electromotoare E_1 și E_2 (fig. 3.11, *b*), defazate cu 90° în urma fluxurilor corespunzătoare, respectiv curenții de inducție I_1 și I_2 în faza cu tensiunile corespunzătoare (fig. 3.12).

Interacțiunea dintre fluxul Φ_1 și curentul I_2 (fig. 3.12) produce un cuplu C_{a12} dat de relația *:

$$C_{a21} = K_{21} \cdot \Phi_1 \cdot I_2 \cos(90° - \alpha) =$$
$$= K_{12} \cdot \Phi_1 \cdot I_2 \sin \alpha. \qquad (3.30)$$

Similar, interacțiunea dintre fluxul Φ_2 și curentul I_1 produce cuplul C_{a21}:

$$C_{a12} = K_{21} \cdot \Phi_2 \cdot I_1 \cos(90° + \alpha);$$
$$C_{a21} = K_{21} \cdot \Phi_2 \cdot I_1 \sin \alpha. \qquad (3.31)$$

Deoarece cele două cupluri au semne opuse, cuplul rezultant C_a va fi dat de expresia:

$$C_a = C_{a12} - C_{a21} = K_{12} \cdot \Phi_1 \cdot I_2 \sin \alpha + K_{21} \cdot \Phi_2 \cdot I_1 \sin \alpha =$$
$$= [K_{12} \cdot \Phi_1 \cdot I_2 + K_{21} \cdot \Phi_2 \cdot I_1] \sin \alpha. \qquad (3.32)$$

Deoarece cei doi curenți I_1 și I_2 sînt proporționali cu fluxurile respective ** rezultă în definitiv:

$$C_a = K_a \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2 \sin \alpha. \qquad (3.33)$$

Deoarece cele două fluxuri sînt la rîndul lor proporționale ** cu curentul de excitație I_i iar pentru un releu dat unghiul α este constant, rezultă în definitiv că cuplul C_a va fi dat de expresia:

$$C_a = K \cdot I_i^2. \qquad (3.34)$$

Pe baza acestui principiu în țara noastră se realizează releul maximal de curent cu caracteristica dependentă tip *RTpC* (fig. 3.13) care reprezintă de fapt o combinație dintre un releu de inducție și unul electromagnetic.

Sistemul de inducție este format dintr-un circuit magnetic *1* (avînd o spiră în scurtcircuit ca în fig. 3.11, *a*) între polii căruia se rotește discul de aluminiu *2*. Discul este așezat pe un ax cu șurub fără sfîrșit care se poate roti în lagărele O_1 și O_1' situate pe cadrul mobil *3*, care la rîndul său se poate roti în jurul unei axe fixe $O_2 - O_2'$. Cadrul *3* este împins împreună cu discul *2* spre partea din spate a figurii datorită resortului *5* și este limitat într-o poziție convenabilă prin șurubul reglabil *4*. În rotirea sa (care se face în sensul de rotire a acelor unui ceasornic) discul *2* este supus acțiunii de frînare a magnetului permanent *6*, acțiune de frînare care crește proporțional cu viteza de rotație a discului respectiv (frecare „vîscoasă" prin curenți turbionari). Releul este prevăzut cu un sector dințat *7* ce se poate roti într-un plan vertical în jurul axei O_3 și care este solidar cu pîrghia *8* care își limitează cursa în partea de jos pînă la opritorul *9*.

Circuitul magnetic *1* este magnetizat de către bobina de excitație *11* prevăzută cu prize reglabile pentru curenți de excitație de 2,5; 3; 4; 5; 6; 8

* Forțele de interacțiune între un cîmp magnetic și un curent.
** Presupunînd că miezul magnetic funcționează nesaturat.

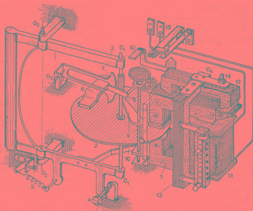


Fig. 3.13. Vedere de ansamblu a releului de inducţie cu o înfăşurare (*RTpC*).

şi 10 A. Sistemul electromagnetic mai cuprinde o armătură mobilă *12* prelungită prin tija *10* şi care poate oscila în jurul axei O_4 de pe suportul *13*. Întrefierul în care se produce atragerea armăturii electromagnetice *12* este limitat prin şurubul *14*.

Funcţionarea releului are loc în felul următor: datorită cuplului activ de inducţie produs de curentul de alimentare al releului (v. fig. 3.11) discul începe să se învîrtească chiar la valori de 15—20% din curentul de excitaţie fără ca releul să acţioneze.

Pentru un anumit curent, viteza de rotaţie se menţine la o turaţie corespunzătoare datorită limitării produse de către magnetul permanent *6*. Dacă intensitatea curentului atinge valoarea de reglare turaţia creşte într-o asemenea măsură încît reacţia forţei de frecare vîscoasă produsă de magnetul permanent *6* împinge discul de aluminiu *2* împreună cu cadrul mobil *3*, învingînd rezistenţa resortului antagonist *5*. În acest mod şurubul fără sfîrşit al axei $O_1—O_1$ angrenează cu sectorul dinţat *7* astfel că pîrghia *8* începe să se deplaseze în sus. După un anumit timp (care depinde de poziţia iniţială a suportului *9*) pîrghia *8* atinge tija *10* şi micşorînd întrefierul armăturii mobile *12* aceasta acţionează brusc închizînd contactul *15*.

Obsrvaţie. Deoarece viteza de rotire a discului deci viteza de deplasare a pîrghiei *8* depinde de valoarea curentului real ce străbate bobina, rezultă că pe măsura creşterii curentului timpul de acţionare scade. Se obţine astfel o caracteristică de temporizare dependentă de curent (fig. 3.14). Cele trei caracteristici de temporizare *10, 6* şi 2 s din figura 3.14 se realizează pentru trei poziţii de reglare a opritorului *9*. (Pentru timpi mai mari opritorul respectiv este mai coborît.) Pentru anumite valori ale factorului de multiplicare a curentului reglat, modificabile cu ajutorul şurubului *14* sistemul electro-

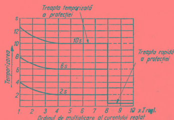


Fig. 3.14. Caracterisiticile de temporizare ale releului $RTpC$.

magnetic acţionează instantaneu (fig. 3.14), realizîndu-se astfel o treaptă rapidă (instantanee) a protecţiei.

Temporizările obţinute cu acest tip de releu sînt reglabile continuu între 2 şi 10 s.

Avantajele acestui tip de releu sînt următoarele:

— faptul că discul se roteşte permanent chiar în funcţionare normală permite să se controleze permanent starea releului; de-altfel capacul releului este prevăzut cu o fereastră cu sticlă ce permite vizualizarea discului;

— releul asigură o funcţie complexă—un element rapid şi unul temporizat — şi este prevăzut şi cu o clapetă de indicare a semnalizării; de asemenea contactele sale sînt robuste şi pot comanda direct declanşarea întreruptorului;

— coeficientul de revenire al sistemului de inducţie este relativ bun (0,75 ... 0,85).

Dezavantajul principal al releului descris rezidă în sistemul electromecanic destul de complicat care face ca precizia sistemului să fie relativ redusă; de asemenea precizia elementului electromagnetic (rapid) este redusă. În sfîrşit un dezavantaj esenţial constă în consumul de putere relativ mare (circa 30 VA).

2. Releu de inducţie cu două înfăşurări

Acest tip de releu serveşte pentru realizarea elementelor direcţionale sau de impedanţă, fiind alimentate cu două mărimi: tensiunea şi curentul. În figura 3.15 este reprezentat un releu direcţional de inducţie cu rotorul din aluminiu realizat în formă de pahar. Miezul magnetic M cuprinde patru poli decalaţi în spaţiu la 90°.

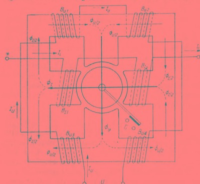


Fig. 3.15. Releu de inducţie cu două înfăşurări.

Bobinele B_{I1} şi B_{I2} sînt legate în serie şi străbătute de curentul I_i, producînd fluxul inductor Φ_i, iar bobinele B_{U1}, B_{U2}, B_{U3} şi B_{U4} sînt legate de asemenea în serie şi alimentate de tensiunea U producînd fluxul Φ_U.

Cele două mărimi de alimentare reprezintă tensiunea şi curentul aferente unui circuit (consumator) electric şi ele vor fi defazate cu un unghi φ (fig. 3.16). Notînd cu γ unghiul de impedanţă al bobinei de

tensiune rezultă că aceasta va fi străbătută de un curent I_u defazat cu unghiul γ față de tensiunea U care l-a produs. Considerînd că fluxurile Φ_i și Φ_u sînt aproximativ * în faza cu curenții care le-au produs, defazajul β între ele va fi (v. fig. 3.16):

$$\beta = \gamma - \varphi \tag{3.35}$$

În conformitate cu cele arătate anterior valoarea cuplului activ al releului va fi:

$$C_a = K \cdot \Phi_u \cdot \Phi_i \sin \beta. \tag{3.36}$$

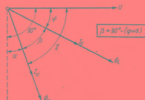


Fig. 3.16. Diagrama mărimilor electrice la releul de inducție cu două înfășurări.

Notînd cu α unghiul complimentar al lui γ adică:

$$\gamma = 90° - \alpha, \tag{3.37}$$

și înlocuind relația (3.37) în (3.35) rezultă:

$$\beta = 90° - (\alpha + \varphi) \tag{3.38}$$

Pe baza acestei relații expresia cuplului activ [relația (3.36)] devine:

$$C_a = K \cdot \Phi_u \cdot \Phi_i \cos (\varphi + \alpha). \tag{3.39}$$

Ținînd seamă de faptul că fluxurile sînt proporționale cu curenții care le-au produs, expresia (3.39) devine:

$$C_a = K_0 \cdot U \cdot I \cos (\varphi + \alpha). \tag{3.40}$$

În concluzie se observă că cuplul activ al releului respectiv este proporțional cu puterea circuitului considerat.

Unghiul α se numește *unghiul intern al releului*.

Releul este prevăzut cu un resort spiral antagonist ce prezintă un cuplu rezistent C_r, practic constant, astfel că condiția de funcționare a releului se poate scrie

$$C_a = K_0 \cdot U \cdot I \cdot \cos (\varphi + \alpha) \geqslant C_r. \tag{3.41}$$

Din relația (3.41) se constată că pentru:

$$\varphi = -\alpha = \varphi_0, \tag{3.42}$$

rezultă valoarea maximă a expresiei:

$$\cos (\varphi + \alpha) = \cos (\varphi_0 + \alpha) = 1, \tag{3.43}$$

deci releul funcționează la cea mai mică valoare a produsului $U \cdot I$.

Ca urmare pentru $\varphi = -\alpha$ releul va prezenta cea mai mare sensibilitate (fig. 3.17) unghiul (respectiv) φ_0 fiind numit *unghiul de sensibilitate maximă a releului*. Similar, se observă că în cazul în care:

$$\varphi = 90° - \alpha \quad \text{sau} \quad \varphi = -90° - \alpha \tag{3.44}$$

---

* În realitate fluxurile Φ_i și Φ_u au un mic defazaj δ față de curenții corespunzători, datorită pierderilor în fierul circuitului magnetic.

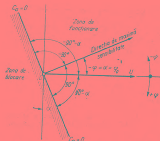


Fig. 3.17. Diagrama de funcționare a releului direcțional de inducție.

rezultă:

$$\cos(\varphi+\alpha)=0, \qquad (3.45)$$

adică cuplul activ este nul și releul nu funcționează (fig. 3.17).

Din figura 3.17 se observă că relațiile (3.44) reprezintă o dreaptă care separă planul fazorilor tensiune (curent) în domeniul de funcționare a releului cuprinzînd direcția (unghiul) de sensibilitate maximă și domeniul de blocare a releului pentru care cuplul activ este negativ adică rotorul tinde să se rotească în sens invers (bate în opritor).

Releele de inducție cu două înfășurări se construiesc ca relee: direcționale, diferențiale, de distanță, de frecvență etc.

F. RELEE TERMICE

Releele termice sînt elemente care funcționează pe baza variației unei mărimi neelectrice și anume temperatura. Datorită faptului că circulația curenților în instalațiile electroenergetice: generatoare, transformatoare etc. produce căldură prin efect Joule-Lenz, necesitatea releelor de temperatură prezintă o importanță deosebită.

Releele termice sînt realizate în diverse variante constructive: cu *bimetal*, *termometrice cu mercur* sau *cu gaz*, *cu termocupluri cu termorezistențe* etc.

1. Relee termice cu bimetal

Aceste tipuri de relee cuprind o lamă plată (fig. 3.18) formată din două elemente metalice M_1 și M_2 sudate împreună avînd coeficienții de dilatare d_1 și d_2 cît mai diferiți.

Prin încălzire de la o sursă S lamela respectivă, care are un capăt încastrat, se încovoaie (se curbează) în sensul metalului cu coeficient de dilatare mai mic datorită dilatării diferite a celor două metale. La o anumită temperatură de reglare, deoarece diferența de alungire crește cu temperatura, puntea P solidară cu lamela bimetalică stabilește contactul C. Poziția contactului C poate fi modificată și fixată de-a lungul unei scări gradate (t °C) cu ajutorul unui șurub de fixare (nefigurat) modificînd astfel valoarea temperaturii de consemn.

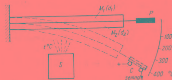


Fig. 3.18. Releu termic cu bimetal.

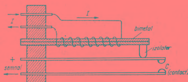


Fig. 3.19. Releu electrotermic cu bimetal.

La unele tipuri de relee sursa de încălzire o constituie o bobină B spiralată pe bimetal (fig. 3.19), caz în care releul se mai numește și *electrotermic*.

2. Relee termometrice cu mercur

Releul termometric cu mercur este asemănător cu un termometru obișnuit (fig. 3.20) fiind format dintr-un tub T având un rezervor cu mercur R situat în zona sursei calde S. În tub se află incluși doi (sau mai mulți) electrozi metalici E_1 și E_2 care constituie de fapt bornele contactului C. Sub influența temperaturii ($t°C$) mercurul se dilată și la o anumită temperatură de reglare închide contactul C. Releele respective se mai numesc și *termometre cu contact*.

3. Relee termometrice cu gaz

Aceste tipuri de relee se bazează pe creșterea presiunii unui gaz sub influența temperaturii. Releul este compus din rezervorul A (fig. 3.21) situat sub influența sursei S de temperatură $t°C$, tubul de legătură T și un tub (burduf)



Fig. 3.20. Releu termometric cu mercur.

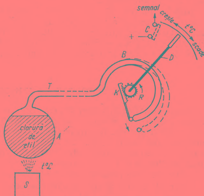


Fig. 3.12. Releu termometric cu gaz.

circular elastic B numit şi tub Bourdon. În rezervor se află o substanţă volatilă — de exemplu clorura de etil — care are punctul de fierbere coborît. La creşterea temperaturii substanţa respectivă se volatilizează, presiunea în tubul Bourdon creşte şi acesta se destinde (figurat punctat) antrenînd prin pîrghia P cremaliera K ce angrenează roata dinţată R. Solidar cu roata respectivă se deplasează braţul D care la o anumită temperatură stabileşte contactul C. Poziţia contactului C este bineînţeles reglabilă. Pe axul tubului Bourdon se poate fixa un ac indicator care să permită citirea temperaturii.

Releele termice mai pot fi realizate cu ajutorul unor traductoare de temperatură, de exemplu *termocupluri* sau *termorezistoare*, a căror mărime electrică de ieşire (tensiune sau rezistenţă electrică) este amplificată prin circuite electrice şi aplicată unui releu electromagnetic.

G. RELEE PRIMARE

Aceste tipuri de relee sînt unele dintre primele forme de elemente de protecţie, marcînd o etapă istorică de trecere de la siguranţele fuzibile la actualele tipuri de relee — releele secundare — care, după cum s-a arătat, sînt racordate la transformatoarele de curent şi tensiune.

Denumirea de relee primare se datoreşte faptului că ele sînt alimentate direct din circuitul primar (principal) al instalaţiilor de înaltă sau joasă tensiune. În general releele primare sînt relee maximale de curent de tip electromagnetic sau termic. De obicei releele primare acţionează *direct* prin tije sau pîrghii asupra dispozitivelor de declanşare ale întreruptoarelor; rareori se întîlnesc relee primare *indirecte* care comandă declanşarea întreruptorului propriu prin intermediul unui contact electric şi al unei bobine.

Ca regulă generală releele primare se montează direct pe bornele izolatoare ale întreruptoarelor.

Releele primare prezintă avantajele eliminării transformatoarelor de curent precum şi a surselor auxiliare de alimentare (baterie de acumulatoare etc.), însă ele au dezavantajele de a avea o funcţie limitată (protecţia maximală de curent), a fi mai puţin sensibile faţă de releele secundare şi a nu permite reglaje şi verificări cu elementul protejat în funcţiune.

H. DISPOZITIVE DE TEMPORIZARE

Dispozitivele de temporizare sînt elemente sau circuite electrice care permit obţinerea funcţiei de întîrziere a semnalelor electrice, adică realizarea constructivă a releelor de timp. În structura releelor de timp se află de obicei un element electromagnetic (v. fig. 3.1) asociat cu un dispozitiv (circuit) de temporizare în funcţie de care se stabileşte şi denumirea releului de timp respectiv. Astfel se deosebesc relee de timp cu:

— mecanism de ceasornic (orlogerie);
— circuit electric special (cu condensator);
— circuit magnetic special (cu spiră în scurtcircuit);
— motor electric.

1. Relee de timp cu mecanism de ceasornic

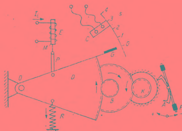


Fig. 3.22. Releu de timp cu mecanism de ceasornic.

Principial, un asemenea releu este compus dintr-un electromagnet (solenoid) E (fig. 3.22) a cărui armătură M este legată prin pîrghia P cu sectorul dințat D care se poate roti în jurul punctului O. Asupra sectorului dințat mai acționează și resortul spiral antagonist R. Sub acțiunea electromagnetului E cînd acesta este parcurs de curentul I_t, sectorul dințat tinde să rotească, în sensul indicat de săgeată, roata B iar aceasta mai departe roata K. Mișcarea acesteia este însă încetinită datorită ancorei A și a balansierului F (similare celor de la ceasornic) care încep să oscileze permițînd rotirea dinte cu dinte a roții K. În acest mod sectorul D se deplasează cu o viteză precis determinată astfel că, în final, prin puntea G se stabilește după un timp bine definit contactul C. Un clichet (nefigurat) plasat pe roata B permite revenirea rapidă a sectorului sub influența resortului spiral R atunci cînd electromagnetul E se dezexcită. Contactul C poate fi plasat în diverse poziții pe o scară gradată astfel ca să se permită reglarea precisă a diverselor valori ale timpului de acționare.

La întreprinderea Electromagnetica se realizează un asemenea releu de timp (tipul *RTpa-5*) pentru tensiunile de alimentare de 24, 48, 60, 110 și 220 V c.c. și cu domeniile de reglare de: 0,1—1,3 s; 0,25—3,5 s; 0,5—9 s și 2—20 s.

În afară de contactul final al releului care rămîne închis atît timp cît bobina rămîne excitată, releul de timp *RTpa-5* mai posedă un contact normal deschis alunecător reglabil la un timp intermediar între valoarea minimă și timpul final de reglare.

2. Relee de timp cu condensator

Prin conectarea unui releu electromagnetic într-un circuit electric RC (rezistor-condensator) se poate obține un releu de timp.

Cea mai folosită schemă este cea din figura 3.23, *a*, în care releul electromagnetic E este legat în paralel cu condensatorul de capacitate C, ambele elemente fiind înseriate cu rezistorul de rezistență R.

Prin închiderea contactului K, deci prin aplicare bruscă a tensiunii U_0 tensiunea U_e la bornele releului E (neglijînd parametrii releului respectiv) va varia în timp după o relație de forma:

$$U_e = U_0(1 - e^{\frac{-t}{RC}}), \qquad (3.46)$$

a cărei reprezentare grafică este prezentată în figura 3.23, b.

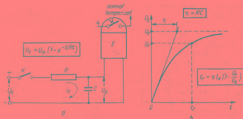


Fig. 3.23. Releu de timp cu condensator:
a — schema electrică; *b* — caracteristici de funcţionare.

Produsul RC se notează de obicei cu $\tau(\tau = RC)$ şi poartă numele de *constantă de timp*.

Presupunînd că releul se excită la o tensiune U_r rezultă că el va acţiona atunci cînd:

$$U_c \geqslant U_r. \tag{3.47}$$

şi explicitînd relaţia (3.46) se va obţine valoarea t_r a timpului de funcţionare a releului de timp astfel realizat:

$$t = t_r = R \cdot C \ln\left(1 - \frac{U_r}{U_0}\right). \tag{3.48}$$

Din relaţia (3.48) se constată că timpul de acţionare este proporţional cu constanta de timp $\tau = RC$ a circuitului electric, deci prin modificarea unuia dintre parametrii R sau C se obţine timpul de reglare dorit.

Observaţie. În realitate timpul de acţionare este influenţat şi de variaţiile tensiunii de alimentare U_0 precum şi de parametrii R şi L ai bobinei releului. Din aceste cauze precizia unui asemenea tip de releu este redusă.

3. Relee de timp cu spiră în scurtcircuit

Realizarea temporizărilor cu ajutorul modificării circuitelor magnetice se obţine de obicei cu o spiră în scurtcircuit S (fig. 3.24) plasată pe miezul magnetic al unui releu electromagnetic E. Spira în scurtcircuit reprezintă de fapt un tub (inel) din cupru masiv numit şi tub amortizor care măreşte dimensiunile releului, în schimb măreşte şi inductanţa proprie a bobinei respective. În acest mod timpul de stabilire a curentului în circuit creşte datorită curentului de autoinducţie în spira în scurtcircuit, deci a fluxului de reacţie (indus) care se opune creşterii fluxului inductor.

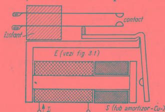


Fig. 3.24. Releu de timp cu spiră în scurtcircuit.

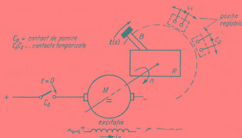


Fig. 3.25. Releu de timp cu motor electric.

Temporizările obținute cu asemenea tipuri de relee sînt nereglabile și au valori mai mici de o secundă.

În țara noastră se fabrică releul de timp (intermediar) cu tub amortizor de tipul *RI-15* avînd trei contacte comutatoare.

4. Relee de timp cu motor electric

Aceste tipuri de relee cuprind în principiu un motor *M* de curent continuu sau alternativ (motor sincron) (fig. 3.25) care antrenează printr-un mic reductor de turație *R* un braț mobil *B* care poate stabili unul sau mai multe contacte C_1, C_2 ... a căror poziție este reglabilă.

În instalațiile energetice se întîlnesc asemenea tipuri de relee folosind motor de curent continuu ca organe componente ale protecțiilor de distanță și avînd contacte multiple.

Industria românească fabrică releele de timp cu micromotor sincron tipul *RTp-4* pentru: 24, 110, 220 și 380 V c.a., 50 Hz în trei variante ale domeniului de reglare: 2—25 s; 8—100 s și 48—600 s și avînd un comutator precum și tipul *RTp-7* pentru aceleași tensiuni însă la 50 Hz sau 60 Hz și cu patru domenii de reglare cuprinse între 0,3 și 6 s (50 Hz) sau 0,25—5 s (60 Hz) și 0,3—6 ore (50 Hz) sau 0,25—5 ore (60 Hz) și avînd patru contacte comutatoare cu posibilitatea de a le alege pe toate temporizate.

REZUMAT

● Releele sînt elemente de automatizare cu o structură analogo-logică (hibridă) adică prezentînd o variație în salt la ieșire atunci cînd mărimea de intrare, variind în mod continuu, atinge o anumită valoare numită *valoare de acționare*.

● Releele se clasifică în funcție de:

— *natura mărimii de intrare* (relee de mărimi electrice și de mărimi neelectrice);

— *modul de realizare al saltului la ieșire* (relee cu contacte și fără contacte);

— *sensul de variație al mărimii de intrare la acționare* (relee maximale, minimale, direcționale);

— *principiul de funcționare* (relee electromagnetice, magnetoelectrice, electrodinamice, de inducție, termice etc.);

— *domeniul de aplicare* (relee de protecție, de automatizare, telefonice etc.);

— *timpul de funcționare* (relee instantanee și temporizate).

● Releele de mărimi electrice care sînt cele mai răspîndite se realizează ca relee: maximale de curent, minimale de tensiune, direcționale, de impedanță, diferențiale, intermediare, de semnalizare, temporizate etc.

● Mărimile caracteristice principale ale unui releu sînt următoarele: natura fizică și parametrii de reglare ai mărimii de intrare, puterea absorbită, numărul și tipul contactelor, puterea de comutare a contactelor în funcție de natura sarcinii și felul curentului, timpul propriu de acționare etc.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Funcționarea unui releu are loc în cazul:
   a) închiderii contactelor normal deschise?
   b) deschiderii contactelor normal închise?
   c) depășirii într-un anumit sens a valorii mărimii de intrare?
2. Acționarea unui releu se poate produce:
   a) numai la excitare?
   b) numai la dezexcitare?
   c) la excitare sau la dezexcitare?
3. Factorul de revenire reprezintă:
   a) raportul dintre valoarea de acționare și cea de revenire?
   b) raportul dintre valoarea de revenire și cea de excitare?
   c) valoarea maximă a timpului de revenire?
4. Releele electromagnetice pot fi folosite:
   a) numai în curent continuu?
   b) numai în curent alternativ?
   c) în curent continuu și alternativ?
5. Releele de inducție pot fi folosite:
   a) numai în curent continuu?
   b) numai în curent alternativ?
   c) în curent continuu și alternativ?
6. Scoțind spira în scurtcircuit de la releul de inducție tip RTpC, acesta:
   a) se învîrtește mai repede?
   b) se învîrtește mai încet?
   c) se oprește?
7. Scoțind magnetul permanent de frînare de la releul de inducție RTpC, acesta:
   a) acționează instantaneu?
   b) acționează cu o temporizare mai lungă sau mai scurtă?
   c) nu mai acționează?

CAPITOLUL 4

CONSTRUCȚIA ȘI FUNCȚIONAREA RELEELOR ELECTRONICE

A. DISPOZITIVE SEMICONDUCTOARE UTILIZATE ÎN CONSTRUCȚIA RELEELOR ELECTRONICE

1. Diode redresoare

Diodele redresoare sînt larg utilizate atît în schemele unor protecții cu relee electromecanice, cum sînt de exemplu schemele cu relee polarizate sau magnetoelectrice (v. cap. 3), cît și în schemele releelor electronice cu dispozitive semiconductoare, denumite și „relee statice" din cauza absenței unor elemente în mișcare, specifice releelor electromecanice.

Diodele redresoare sînt utilizate pentru ca din tensiuni alternative (respectiv curenți alternativi) să fie obținute tensiuni continue (respectiv curenți continui). Simbolul folosit pentru diodele redresoare este reprezentat în figura 4.1, vîrful cu bară al triunghiului indicînd sensul de conducție al diodei.

Dacă diodei i se aplică o tensiune de asemenea polaritate încît potențialul bornei *A* este mai ridicat decît al bornei *B*, atunci dioda este polarizată direct și se găsește în regim de conducție; în caz contrar, dioda este polarizată invers.

În cadranul I din figura 4.2 este reprezentată dependența dintre curentul prin diodă i_{dir} și tensiunea la bornele diodei u_{dir} în cazul polarizării directe. Se constată că pentru valori mici ale tensiunii u_{dir} (fracțiuni de volt) curentul i_{dir} are valori relativ importante (de ordinul sutelor de miliamperi sau de ordinul amperilor) deci dioda se găsește în conducție; uneori se spune că dioda este „deschisă". Raportul dintre u_{dir} și i_{dir} reprezintă rezistența directă și are valori foarte mici.



Fig. 4.1. Simbol pentru diode redresoare.

În cadranul IV din figura 4.2 este reprezentată — cu alte scări pe axele de coordonate — dependența dintre curentul i_{inv} și tensiunea u_{inv} la polarizarea inversă. Se constată că pentru tensiuni u_{inv} de ordinul sutelor de volți rezultă curenți i_{inv} foarte mici, de ordinul zecilor de microamperi, deci raportul dintre u_{inv} și i_{inv} (reprezentînd rezistența inversă) are valori foarte mari. Datorită acestui fapt, se consideră că la polarizări inverse diodele sînt blocate, respectiv nu conduc (uneori se spune că diodele sînt „închise"); de fapt, prin diodele polarizate invers circulă curenți extrem de mici, neglijabili.

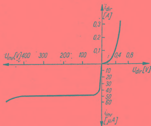


Fig. 4.2. Caracteristica statică a diodei redresoare.

Dependența dintre curenți și tensiuni din figura 4.2 constituie caracteristica statică a diodei.

Aprecierea calității unei diode redresoare se poate face prin raportul *M* dintre rezistența inversă și rezistența directă, calitatea diodei fiind cu atît mai bună, cu cît raportul *M* este mai mare.

Cele mai utilizate diode redresoare sînt cele realizate din monocristale de germaniu sau siliciu. Diodele cu siliciu sînt mai avantajoase, deoarece au un raport *M* mai mare și admit tensiuni inverse mai ridicate și temperaturi mai mari.

La noi în țară se fabrică, la I.P.R.S. Băneasa, diode redresoare cu germaniu tip *EFD* și *EFR*, diode redresoare cu siliciu tip *DRR, F, KS, KU, RA*; caracteristicile acestor diode sînt prezentate în cataloage.

2. Diode stabilizatoare (diode Zener)

Diodele stabilizatoare (Zener) sînt folosite pentru obținerea unei tensiuni stabilizate, în condițiile unor variații importante ale curentului.

Simbolul utilizat pentru aceste diode este reprezentat în figura 4.3, iar aspectul caracteristicii statice este prezentat în figura 4.4. În cazul polarizării directe diodele stabilizatoare conduc curentul ca și diodele redresoare cu siliciu, avînd aceeași caracteristică în cadranul I.

În domeniul tensiunilor u_{inv} de polarizare inversă apare o zonă în care tensiunea inversă u_{inv} rămîne practic constantă (zona *AB* din figura 4.4), avînd valoarea u_z, iar curentul invers i_{inv} variază în limite foarte largi. Funcționînd în această zonă, denumită *zona tensiunii inverse de străpungere*, diodele stabilizatoare asigură stabilizarea tensiunii.

La noi în țară se fabrică, la I.P.R.S. Băneasa, diode stabilizatoare de tip *DZ, PL, 1N*, avînd caracteristicile expuse în cataloage.

3. Tranzistoare

În figura 4.5, *a* este reprezentată schema simplificată a unui tranzistor *pnp* în conexiune cu emitor comun (care este cea mai utilizată în protecții electronice), iar în figura 4.5, *b* este reprezentată schema echivalentă.



Fig. 4.3. Simbol pentru diode stabilizatoare.

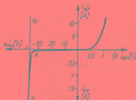


Fig. 4.4. Caracteristica statică a diodei stabilizatoare.

Bornele *1—1'* sînt bornele de intrare (între ele se aplică semnalul de intrare), bornele *2—2'* sînt bornele de ieșire (de la ele se obține semnalul de ieșire), bateria E_B asigură o polarizare a bazei — analoagă cu negativarea grilei la triodele cu vid — iar în circuitul colectorului se găsesc bateria de colector E_C și rezistența de colector R_c. Emitorul intervine și în circuitul de intrare și în cel de ieșire, de aceea schema este denumită „cu emitor comun".

În schema echivalentă din figura 4.5, *b* nu mai sînt reprezentate bateriile și bornele *1'* și *2'*. Întrucît rezistențele interne ale bateriilor sînt neglijabile, se poate considera că semnalul de intrare este aplicat

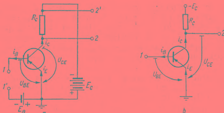


Fig. 4.5. Tranzistor *pnp*:
a — schema de principiu; *b* — schema echivalentă.

între borna *1* și punctul de potențial nul (masa), iar semnalul de ieșire este obținut între borna *2* și masă.

Ca semnal de intrare poate fi considerat curentul de bază i_B sau tensiunea bază-emitor u_{BE}. Dependențele dintre curentul de colector i_C (considerat ca semnal de ieșire) și tensiunea colector-emitor u_{CE}, pentru diferite valori ale curentului de bază i_B, constituie caracteristicile statice de ieșire ale tranzistorului în conexiunea cu emitor comun. Aspectul acestor caracteristici este ilustrat în figura 4.6.

În figura 4.6 sînt trasate și dreptele de sarcină (*a*) și (*b*), rezultate din aplicarea teoremei lui Kirchhoff la circuitul de ieșire din figura 4.5, *a*, rezultînd relația:

$$E_C = u_{CE} + R_C i_C. \quad (4.1)$$

Pentru:

$$i_C = 0$$

din relația (4.1) se obține:

$$u_{CE} = E_C,$$

iar pentru:

$$u_{CE} = 0$$

rezultă:

$$i_C = \frac{E_C}{R_C}.$$

Cele două drepte de sarcină (*a*) și (*b*) au fost trasate pentru valori diferite, R_{Ca} și R_{Cb}, ale rezistenței de colector R_C, cu

$$R_{Cb} > R_{Ca}$$

și deci:

$$\frac{E_C}{R_{Cb}} < \frac{E_C}{R_{Ca}}.$$

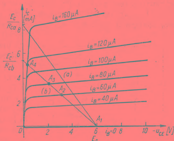


Fig. 4.6. Caracteristicile statice ale tranzistorului.

Caracteristicile statice de ieșire și dreptele de sarcină permit delimitarea regiunilor de blocare și

de conducție în funcționarea tranzistorului. Astfel, de exemplu, pentru $R_C = R_{Cb}$ (dreapta b din figura 4.6) se constată că dacă $i_B = 0$ punctul de funcționare se găsește în A_1, la intersecția caracteristicii pentru $i_B = 0$ cu dreapta b, și rezultă $i_C = 0$, tranzistorul nu conduce, respectiv este blocat.

Aplicînd un curent de intrare $i_B = 60$ μA, punctul de funcționare trece în A_2 și tranzistorul se va găsi în conducție, cu un curent de ieșire i_C de circa 2,6 mA.

Mărind curentul de intrare pînă la valoarea $i_B = 80$ μA, punctul trece în A_3 și curentul de ieșire i_C crește pînă la circa 3,4 mA, iar pentru $i_B = 120$ μA punctul trece în A_4, cu un curent i_C de circa 5,2 mA.

Dacă se continuă mărirea curentului i_B, de exemplu pînă la $i_B = 160$ μA, se constată că punctul de funcționare rămîne în A_4 și deci curentul de ieșire i_C nu mai crește. Ca urmare, punctul A_4 aparține regiunii de funcționare în saturație, întrucît prin creșterea curentului de intrare i_B nu se mai poate obține o creștere a curentului de ieșire i_C.

Pentru ca curentul de bază i_B să fie diferit de zero și tranzistorul să se găsească în conducție este necesar ca joncțiunea emitor-bază să fie polarizată direct, deci este necesară o anumită polaritate a tensiunii bază-emitor u_{BE}. La schimbarea polarității acestei tensiuni rezultă $i_B = 0$ și tranzistorul se blochează. Schema analizată pune în evidență funcția de amplificator al tranzistorului, curentul de ieșire i_C avînd valori de peste 40 de ori mai mari decît curentul de intrare i_B.

La noi în țară se fabrică, la I.P.R.S. Băneasa, tranzistoare cu germaniu de tip *AC, AD, ASZ, AUY, EFT* și tranzistoare cu siliciu de tip *BC, BD, BF*, ale căror caracteristici se găsesc în cataloage.

B. RELEE ELECTRONICE

1. Relee de curent și de tensiune

În schemele protecțiilor electronice pot interveni numai elemente electronice sau pot interveni elemente electronice și relee electromecanice. În primul caz este realizat cu elemente electronice și blocul de ieșire *BE* din figura 1.1, care transmite comanda de declanșare întrerupătorului. În al doilea caz, elementele de ieșire sînt realizate prin intermediul unor relee electromecanice. Întrucît această variantă este cea mai utilizată, ea va fi prezentată în continuare.

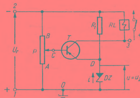


Fig. 4.7. Releu electronic de curent sau tensiune.

Schema simplificată a unui releu de curent sau de tensiune este reprezentată în figura 4.7. Tranzistorul T este conectat în schemă cu emitor comun, în circuitul de emitor este introdusă dioda Zener DZ, în locul rezistenței de colector este conectată bobina releului electromagnetic RL, iar baza tranzistorului este legată la cursorul C al potențiometrului P.

La bornele extreme 1—2 rezistența potențiometrului P este alimentată cu tensiunea continuă U_r, care reprezintă mărimea controlată de releu. Această tensiune poate fi obținută prin redresarea tensiunii secundare a unui transformator de tensiune conectat în circuitul instalației electroenergetice protejate (în acest caz releul fiind un releu de tensiune) sau prin redresarea curentului secundar al unui transformator de curent (în acest caz releul fiind un releu de curent).

În serie cu dioda DZ este conectată rezistența R_1, circuitul format fiind alimentat tot cu tensiunea U_r.

Datorită diodei stabilizatoare DZ, potențialul punctului D (și al emitorului) este menținut constant, la valoarea tensiunii u_z.

Dacă tensiunea U_r se găsește sub valoarea de pornire, atunci potențialul cursorului C (și al bazei tranzistorului) este mai ridicat decît al punctului D și al emitorului, joncțiunea emitor-bază este polarizată invers și tranzistorul T este blocat. Ca urmare, curentul de colector, care circulă prin bobina releului electromagnetic RL are o valoare neglijabilă și acest releu rămîne în stare de repaus, cu contactele deschise.

Dacă tensiunea U_r crește și depășește valoarea de pornire, atunci crește curentul prin potențiometrul P și căderea de tensiune în porțiunea AC a potențiometrului, potențialul cursorului (și al bazei) scade și joncțiunea emitor-bază va fi polarizată direct. Ca urmare, tranzistorul T intră în conducție, curentul de colector capătă o valoare importantă și releul RL acționează.

Releul electronic din figura 4.7 este deci un releu maximal (de tensiune sau de curent), acționînd la creșterea mărimii controlate peste valoarea de pornire. Modificarea valorii de pornire se obține prin modificarea poziției cursorului potențiometrului P.

Releul analizat îndeplinește funcțiunea de detector de nivel critic, controlînd valoarea tensiunii sau curentului și acționînd cînd a fost atins sau depășit un nivel critic reprezentat de valoarea de pornire stabilită.

2. Relee direcționale, diferențiale și de impedanță

Releele de tensiune sau de curent controlează amplitudinea tensiunii sau curentului, fiind deci alimentate cu o singură mărime (tensiunea sau curentul).

După cum s-a specificat în capitolul 2, releele direcționale controlează defazajul dintre tensiuni și curenți, deci trebuie alimentate cu două mărimi.

În multe scheme de protecție, controlul unui defazaj în raport cu valoarea de 90° se efectuează prin intermediul comparării unor amplitudini. Această posibilitate este ilustrată cu ajutorul diagramelor fazoriale din figura 4.8.

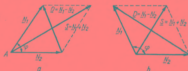


Fig. 4.8. Diagrame fazoriale pentru ilustrarea controlului unui defazaj prin intermediul comparării unor amplitudini:
a — cazul $\varphi < 90°$; *b* — cazul $\varphi > 90°$.

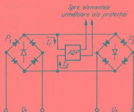


Fig. 4.9. Releu direcțional static.

Astfel, dacă defazajul φ dintre fazorii $\underline{N}_1$ și $\underline{N}_2$ este mai mic decît 90° (fig. 4.8, *a*), atunci modulul sumei fazoriale $\underline{S} = \underline{N}_1 + \underline{N}_2$ este mai mare decît modulul diferenței fazoriale $\underline{D} = \underline{N}_1 - \underline{N}_2$, deci:

$$|\underline{S}| > |\underline{D}|. \tag{4.2}$$

Dimpotrivă, dacă defazajul φ este mai mare decît 90° (fig. 4.8, *b*), atunci modulul sumei S este mai mic decît modulul diferenței D, deci:

$$|\underline{S}| < |\underline{D}|. \tag{4.3}$$

Controlul defazajelor poate fi astfel efectuat prin compararea unor amplitudini. Acest principiu este folosit în funcționarea releului direcțional static *RDc*, elaborat și fabricat la ICEMENERG.

Schema simplificată a acestui releu este reprezentată în figura 4.9. Tensiunea $\underline{U}_1$ este obținută prin însumarea fazorială a unor mărimi și deci corespunde sumei $\underline{S}$ din figura 4.8, iar tensiunea $\underline{U}_2$ este obținută prin scădere fazorială și corespunde diferenței $\underline{D}$ din figura 4.8.

Punțile de redresare P_1 și P_2 sînt realizate cu diode redresoare și realizează redresarea ambelor alternanțe (pozitive și negative) ale mărimilor alternative $\underline{U}_1$ și $\underline{U}_2$ cu care sînt alimentate; datorită acestui fapt, redresarea realizată de punți este denumită „redresare dublă alternanță". Uneori diodele din cele 4 brațe ale punții nu mai sînt reprezentate, fiind înlocuite cu simbolul unei diode reprezentat în centrul punții, simbol care indică sensul curentului redresat de punte (fig. 4.9).

Puntea P_1 debitează curentul redresat I_1, iar puntea P_2 debitează curentul redresat I_2. Acești curenți circulă în sensuri opuse prin rezistența de intrare a amplificatorului electronic detector de polaritate *ADP*, reprezentat simbolic printr-un dreptunghi în figura 4.9.

Amplificatorul *ADP* are 5 tranzistoare și un releu electromecanic la ieșire.

Dacă între curenții I_1 și I_2 are loc relația:

$$I_1 > I_2, \tag{4.4}$$

ceea ce corespunde relației:

$$|\underline{U}_1| > |\underline{U}_2|, \tag{4.5}$$

atunci joncțiunea emitor-bază a primului tranzistor al amplificatorului *ADP* este polarizată direct, acest tranzistor se găsește în conducție și restul schemei se află în repaus, releul electromecanic de la ieșire avînd contactele deschise.

Dacă între curenții redresați are loc relația:

$$I_1 > I_2, \tag{4.6}$$

corespunzătoare relației:

$$|\underline{U}_1| > |\underline{U}_2|, \tag{4.7}$$

atunci primul tranzistor se blochează, toate celelalte elemente ale schemei își modifică starea anterioară și releul electromecanic își închide contactul, transmițînd un semnal spre elementele următoare ale protecției.

Comparatoare de amplitudini analoage cu cel reprezentat simplificat în figura 4.9 sînt utilizate, de asemenea, în cadrul releelor electronice diferențiale și al releelor electronice de impedanță, prezentate în capitolele 9 și 14.

C. COMPARAȚIE ÎNTRE RELEELE ELECTROMECANICE ȘI RELEELE ELECTRONICE

1. Avantajele releelor electronice

Printre avantajele mai importante ale releelor electronice se numără următoarele:

● Releele și protecțiile electronice permit obținerea unei rapidități superioare celei atinse de releele electromecanice și de protecțiile realizate cu aceste relee. De aceea folosirea releelor electronice este indicată îndeosebi în cazurile în care rapiditatea de acționare are un rol important.

● Releele electronice permit obținerea unor caracteristici de acționare superioare celor asigurate de releele electromecanice, fiind îmbunătățite în special performanțele de selectivitate și sensibilitate.

● Folosirea componentelor electronice în construcția releelor a condus la elaborarea unor noi principii de realizare a protecțiilor. Datorită acestui fapt, folosirea releelor electronice este indicată mai ales în cadrul protecțiilor complexe, alimentate cu două sau mai multe mărimi, îndeosebi în cazul controlului unor defazaje.

● Prin utilizarea releelor electronice se asigură o reducere importantă a consumului de la transformatoarele de curent, ceea ce permite evitarea funcționării în saturație a circuitelor magnetice ale acestor transformatoare, deci micșorarea erorilor care pot interveni în funcționarea protecției.

● Releele și protecțiile electronice au gabarite mai mici decît cele electromecanice, conducînd la reducerea dimensiunilor panourilor și a camerelor în care sînt instalate.

2. Dezavantajele releelor electronice

● Releele și protecțiile electronice sînt influențate de factori perturbatori (în special de variațiile temperaturii mediului ambiant) în măsură mult mai mare decît releele electromecanice. Trecerea de la tranzistoarele cu germaniu la tranzistoarele cu siliciu a micșorat acest dezavantaj, schemele cu tranzistoare cu siliciu avînd o stabilitate mai ridicată a performanțelor în condițiile variației temperaturii ambiante.

● Vecinătatea dintre instalațiile electroenergetice protejate, prin care circulă curenți de ordinul kiloamperilor, și schemele electronice de protecție, prin care circulă curenți de ordinul microamperilor, constituie o dificultate în utilizarea releelor electronice. Dificultatea este determinată de faptul că supratensiunile induse în circuitele electronice (din cauza variației curenților din instalațiile protejate, în special la efectuarea unor comutări în circuitele primare, de înaltă tensiune) pot conduce la deteriorarea tranzistoarelor.

Din acest punct de vedere, fiabilitatea echipamentelor electronice de protecţie este inferioară fiabilităţii echipamentelor cu relee electromecanice.

Pentru micşorarea valorilor supratensiunilor induse este necesar ca echipamentele electronice de protecţie să fie judicios amplasate în raport cu circuitele primare protejate, să fie folosite cabluri ecranate, să se realizeze în bune condiţiuni legăturile la pămînt.

De asemenea, influenţa comutărilor din circuitele operative de curent continuu ale staţiilor electrice asupra funcţionării releelor electronice constituie un dezavantaj al acestei categorii de relee.

● În exploatarea releelor electronice intervin unele dificultăţi determinate de faptul că utilizarea acestor relee se găseşte încă într-o perioadă de început, protecţiile electronice necesitînd încă verificări îndelungate în exploatare şi ample încercări de laborator.

3. Perspective

Una dintre soluţiile care se conturează în prezent constă în folosirea în paralel a noilor protecţii electronice cu protecţiile clasice, cu relee electromecanice. În acest mod, marea responsabilitate a protecţiei unor importante instalaţii electroenergetice nu este în întregime încredinţată unor echipamente de protecţie cu totul noi, ci este împărţită între acestea şi echipamentele îndelung verificate cu relee electromecanice, care le dublează pe cele electronice.

Această dublare, care permite verificarea îndelungată în exploatare a protecţiilor electronice fără riscuri în privinţa securităţii instalaţiilor protejate, este justificată economic, întrucît pentru instalaţiile electroenergetice importante linia actuală constă nu numai în dublarea protecţiilor de bază prin protecţii de rezervă, ci chiar în dublarea protecţiilor de bază, pentru creşterea siguranţei în funcţionare.

Folosirea circuitelor integrate va permite extinderea utilizării protecţiilor electronice, datorită avantajelor acestor circuite din punct de vedere al fiabilităţii, performanţelor şi miniaturizării.

REZUMAT

● Diodele redresoare sînt caracterizate de rezistenţe directe foarte mici (în cazul polarizării directe, cînd se găsesc în conducţie, respectiv sînt *deschise*) şi de rezistenţe inverse foarte mari (în cazul polarizării inverse, cînd sînt blocate, respectiv *închise*).

Pentru redresarea dublă alternanţă se folosesc punţi formate din diode redresoare.

● În cazul polarizării directe, diodele stabilizatoare (Zener) se comportă ca diodele redresoare, iar în cazul polarizării inverse diodele stabilizatoare sînt caracterizate de prezenţa unei zone în care tensiunea la borne rămîne practic constantă în condiţiile unor variaţii importante ale curentului prin diodă.

Prezenţa acestei zone (denumită *zona tensiunii inverse de străpungere*) permite folosirea diodelor stabilizatoare pentru stabilizarea tensiunii.

● Conexiunea tranzistorului în schemă cu emitor comun pune în evidență funcția de amplificator al tranzistorului, curentul de colector i_C (reprezentînd semnalul de ieșire) avînd valori de zeci de ori mai mari decît curentul de bază i_B (reprezentînd semnalul de intrare) în cazul polarizării directe a joncțiunii emitor-bază. În cazul polarizării inverse a acestei joncțiuni, prin schimbarea polarității tensiunii bază-emitor u_{BE}, tranzistorul se blochează.

● Releele electronice maximale de curent sau de tensiune (care sînt alimentate cu o singură mărime electrică) pot fi realizate prin intermediul unei scheme cu un tranzistor, cu o diodă Zener, cu un potențiometru și cu un releu electromecanic.

Potențialul emitorului este menținut constant cu ajutorul diodei Zener, potențialul bazei (legată la cursorul potențiometrului) variază în funcție de valorile tensiunii sau curentului controlat, iar bobina releului electromecanic este conectată în circuitul de colector.

Cînd tensiunea (sau curentul) depășește valoarea de pornire, potențialul bazei devine inferior potențialului emitorului, joncțiunea emitor-bază este polarizată direct, tranzistorul intră în conducție și releul electromecanic din circuitul de colector își închide contactele.

● Releele electronice direcționale pot fi realizate prin intermediul comparării unor amplitudini. Comparatoarele de amplitudini sînt formate din două punți de redresare dublă alternanță care alimentează cu curenți de sensuri opuse un amplificator electronic detector de polaritate.

Comparatoarele de amplitudini pot fi utilizate și pentru realizarea releelor electronice diferențiale și de impedanță.

● Avantajele releelor electronice constau în acționare mai rapidă, posibilitatea obținerii unor caracteristici cu performanțe superioare de selectivitate și sensibilitate și a elaborării unor noi principii de realizare a protecțiilor, reducerea consumului de la transformatoarele de curent și gabarite mai mici decît în cazul releelor electromecanice.

● Dezavantajele releelor electronice constau în influența exercitată de variațiile temperaturii mediului ambiant, în fiabilitatea mai redusă din cauza pericolului de deteriorare a tranzistoarelor ca urmare a supratensiunilor induse în schemele electronice de variațiile curenților primari din instalațiile protejate, în necesitatea unor verificări îndelungate în exploatare și a unor ample încercări de laborator, avînd în vedere stadiul de început în care se găsesc încă protecțiile electronice.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Care este raportul dintre rezistența directă și rezistența inversă a unei diode redresoare?
   a) Rezistența inversă este mult mai mare?
   b) Rezistența directă este mai mare?
   c) Cele două rezistențe au valori apropiate?
2. Cum variază tensiunea și curentul în zona tensiunii inverse de străpungere a caracteristicii diodelor stabilizatoare (Zener)?
   a) Tensiunea și curentul au variații importante?
   b) Tensiunea este constantă și curentul are variații importante?
   c) Curentul este constant și tensiunea are variații importante?

3. Cum trebuie să fie polarizată joncţiunea emitor-bază pentru ca tranzistorul să se găsească în conducţie?
   a) Polarizare directă?
   b) Polarizare inversă?
   c) Să lipsească polarizarea?
4. Cum este menţinut constant potenţialul emitorului tranzistorului din releele electronice maximale de tensiune sau curent?
   a) Prin intermediul unei diode redresoare?
   b) Prin intermediul unei rezistenţe?
   c) Prin intermediul unei diode stabilizatoare?
5. Cum trebuie alimentat amplificatorul electronic detector de polaritate pentru realizarea unui comparator de amplitudini?
   a) De o singură punte de redresare?
   b) De două punţi de redresare, cu curenţi de acelaşi sens?
   c) De două punţi de redresare, cu curenţi de sensuri opuse?
6. Ce performanţă este inferioară la releele electronice în raport cu cele electromecanice?
   a) Fiabilitatea?
   b) Rapiditatea?
   c) Sensibilitatea?

CAPITOLUL 5

TRANSFORMATOARE DE MĂSURĂ

A. CONSIDERAŢII GENERALE

1. Introducere

În dirijarea sistemelor electroenergetice adică în conducerea proceselor de producere, transport, distribuţie şi utilizare a energiei electrice, un rol determinant revine informării cu caracter cantitativ asupra parametrilor electrici din procesul respectiv. Deşi numărul acestor parametri (mărimi) electrici este destul de mare (intensitate, tensiune, frecvenţă, putere, impedanţă, admitanţă, fază etc.) el se reduce, practic, numai la doi şi anume: *curentul* (intensitate) *şi tensiunea*, cu ajutorul cărora se pot obţine toate celelalte mărimi. Aceste două mărimi de bază pot fi folosite fie sub forma lor primitivă, fie ca componente simetrice ale acestora (de exemplu: curentul de secvenţă inversă, tensiunea de secvenţă homopolară etc.) fie, în sfîrşit, sub forma unor combinări adecvate între curent şi tensiune, care să asigure obţinerea altor mărimi ce interesează (de exemplu raportul între tensiune şi curent defineşte impedanţa circuitului în care s-a efectuat măsurarea etc.).

În ceea ce priveşte informarea cantitativă asupra mărimilor electrice din proces, operaţie denumită în general *măsurare*, ea se poate efectua pentru următoarele scopuri:

— **măsurarea** propriu-zisă, caz în care mărimile respective sînt aplicate unor aparate de măsură (voltmetre, ampermetre, cosfimetre, wattmetre, contoare de energie electrică etc.), cu ajutorul cărora ele sînt afişate, înregistrate, integrate etc. Pe baza acestei funcţii de măsurare se asigură exploatarea optimă în condiţii normale a sistemului energetic;

— **protecţia prin relee,** situaţie în care mărimile sînt aplicate releelor şi sistemelor de protecţie care asigură exploatarea optimă în condiţii anormale (de avarie) a sistemului energetic (v. cap. 1).

Observaţie. Procesul de măsurare, de fapt de *control automat*, al mărimilor electrice constituie în acest caz o parte componentă a funcţiei de protecţie prin relee deoarece este însoţit, de obicei, şi de comanda automată de declanşare a întreruptoarelor, iar uneori de semnalizarea automată a unor regimuri anormale;

— **automatizări energetice,** caz în care mărimile electrice sînt aplicate altor dispozitive de automatizare (de exemplu sincronizare automată, reanclanşarea automată etc.).

În instalaţiile electrice de joasă tensiune (de exemplu 220/380 V) şi de curenţi de valori relativ reduse (de exemplu 100—200 A) măsurarea parametrilor electrici se poate efectua în mod direct în circuitele respective.

În instalațiile de curent alternativ de înaltă tensiune (de exemplu 6... ... 20—220, 400 kV etc.) și la care curenții ating intensități de ordinul a mii sau chiar zeci de mii de amperi, parametrii electrici nu mai pot fi măsurați direct ci prin intermediul transformatoarelor de măsură. Se deosebesc transformatoare de curent, respectiv de tensiune denumite uneori și *reductoare de curent* (de tensiune) datorită faptului că valorile mărimilor obținute sînt întotdeauna mai mici (reduse) decît cele reale, bineînțeles într-un anumit raport de transformare.

Transformatoarele de curent construite în țara noastră precum și majoritatea transformatoarelor de tensiune sînt de tipurile inductive, adică folosind miezuri magnetice și cuplaje inductive între înfășurări; în plus pentru tensiuni foarte înalte se construiesc transformatoare de tensiune capacitive, folosind de fapt divizoare capacitive de tensiune.

2. Funcțiunile transformatoarelor de măsură

Pe baza celor arătate mai sus pot fi definite următoarele funcțiuni pe care le îndeplinesc transformatoarele de măsură într-un sistem electroenergetic:

— **reducerea curentului și tensiunii de la valorile lor reale la valori convenabile alimentării aparatelor de măsurare, releelor de protecție și de automatizare** etc.; la secundarele transformatoarelor de măsură se obțin valori standardizate nominale de 5 sau 1 A, respectiv de 100 V.

Observație. Unificarea valorilor secundare nominale ale transformatoarelor de măsurare prezintă marele avantaj al unificării tipurilor aparatelor de măsurare și protecție. Astfel, de exemplu, toate ampermetrele folosite în instalațiile electroenergetice au bobina lor construite numai pentru 5 A (sau 1 A) chiar dacă indicațiile de pe scara acestora sînt de sute sau mii de amperi;

— **izolarea galvanică a aparatelor de măsurare, a releelor de protecție și a dispozitivelor de automatizare față de tensiunea înaltă din circuitele primare inclusiv adoptarea unor măsuri suplimentare de protecție** (de exemplu legarea la pămînt) ceea ce asigură implicit protecția personalului de exploatare față de instalațiile de înaltă tensiune (v. paragraful E);

— **posibilitatea conectării prin montaje speciale a înfășurărilor secundare de curent și tensiune în scopul obținerii unor mărimi care reflectă într-o măsură mai exactă o anumită stare de avarie**; de exemplu conectînd în paralel înfășurările secundare ale transformatoarelor de curent de pe cele trei faze se obține componenta homopolară de curent a cărei apariție evidențiază o punere la pămînt a unei faze.

3. Particularitățile transformatoarelor de măsură pentru protecția prin relee

Pentru automatizări în general și pentru protecția prin relee în special, transformatoarele de curent și tensiune prezintă unele particularități față de cele utilizate exclusiv pentru măsurarea propriu-zisă.

Deși toate transformatoarele de măsură au aceleași principii de funcționare și constructive, ele se deosebesc prin faptul că regimul lor de funcționare

diferă de la un caz la altul. Altfel, de exemplu, în timp ce transformatoarele folosite la măsurare funcționează în regim normal de exploatare, adică la valori ale mărimilor variind în jurul celor nominale, transformatoarele utilizate în protecția prin relee trebuie să corespundă regimurilor de avarie adică, de exemplu, transformatoarele de curent trebuie să funcționeze cu precizie bună și la valori ale curentului de scurtcircuit care ating 20—30 de ori valorile nominale.

B. TRANSFORMATOARE DE CURENT

1. Construcție, funcționare, caracteristici

● **Construcția.** Transformatorul de curent cuprinde un miez magnetic *M* (fig. 5.1, *a*), o înfășurare primară *B* caracterizată printr-un număr de spire *N* relativ mic și o înfășurare secundară *b*, cu un număr de spire *n* relativ mare.

Înfășurarea primară se leagă în serie pe circuitul principal și este străbătută de curentul *I* (fig. 5.1, *b*), iar înfășurarea secundară debitează curentul *i* pe aparatele de măsurat A_1, A_2... sau releele R_1, R_2... (sarcina secundară) legate în serie.

Miezul magnetic și cele două înfășurări sînt închise într-o carcasă izolată, prevăzută cu izolatoare de racordare.

Construcția cu izolatoarele în sensuri opuse (fig. 5.2, *a*) permite folosirea transformatoarelor ca elemente de trecere a circuitului dintr-o încăpere în alta, motiv pentru care ele se și numesc transformatoare de trecere. Soluția se adoptă în special la medie tensiune (10, 20 și 35 kV) și în special la stațiile interioare. Un alt tip constructiv este tipul suport (fig. 5.2, *b*), cînd se prevede un singur izolator și pentru intrare și pentru ieșire. Soluția se aplică la tensiuni înalte, de obicei la stațiile exterioare (110, 220, 400 kV etc.), unde izolatoarele sînt mai scumpe.

Pentru izolarea înfășurărilor se poate folosi: porțelan, rășină, ulei mineral sau bachelită.

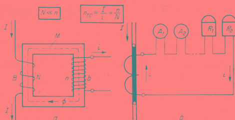


Fig. 5.1. Transformator de curent:
a — structura constructivă; *b* — schema simbolică.

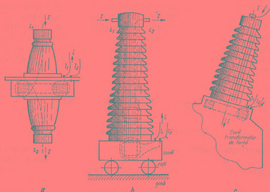


Fig. 5.2. Tipuri de transformatoare de curent:
a — de trecere; *b* — suport; *c* — inclus în izolatorul transformatorului de forţă.

În funcţie de caracteristicile lor constructive, transformatoarele de curent de fabricaţie românească se notează de obicei cu patru simboluri literale avînd semnificaţiile de mai jos, urmate de un număr ce indică tensiunea nominală:

C — transformator de curent;
I — pentru montaj interior;
E — pentru montaj exterior;
P — cu izolaţie de porţelan;
R — cu izolaţie de răşină;
U — cu izolaţie de ulei;
B — cu izolaţie de bachelită;
S — tip suport;
T — tip de trecere;
H — pentru componenta homopolară;
Sr — cu saturaţie rapidă;
TF — pentru montaj în izolatoarele transformatoarelor de forţă.

Observaţie. În acest ultim caz (*TF*) transformatoarele nu au o izolaţie proprie, ci sînt constituite din torurile de fier *F* (fig. 5.2, *c*) cu înfăşurările secundare *b* introduse în izolatorul (borna) transformatorului de forţă, tija de trecere a curentului *I* constituind înfăşurarea primară a transformatorului de curent.

Exemplu de notare: *CEPS-110* = transformator de curent (*C*) pentru montaj exterior (*E*) cu izolaţie de porţelan (*P*), de tip suport (*S*) cu tensiunea nominală de 110 kV (110).

● **Funcţionarea.** Relaţia dintre curentul măsurat *I* şi curentul secundar *i* se exprimă la transformatoarele de curent astfel:

$$I = I_0 + \frac{n}{N} i = I_0 + n_{TC} i \tag{5.1}$$

în care s-a notat:

I_0 este curentul de mers în gol;

n_{TC} — raportul de transformare $n_{TC} = \frac{n}{N}$.

Dacă se neglijează curentul I_0, relația (5.1) devine:

$$I = n_{TC} i, \qquad (5.2)$$

deci raportul de transformare se poate scrie:

$$n_{TC} = \frac{I}{i} = \frac{n}{N} \cdot \qquad (5.3)$$

Deoarece curentul primar este mult mai mare (sute sau mii de amperi) față de cel secundar ($i = 5$ A sau $i = 1$ A), rezultă că numărul de spire al înfășurării secundare este mult mai mare decît cel al înfășurării primare.

Uneori înfășurarea primară trece o singură dată prin interiorul miezului magnetic (fig. 5.2, *c*), ceea ce înseamnă de fapt că înfășurarea respectivă are numai o jumătate de spiră.

Ca la orice transformator și la cel de curent se deosebesc două regimuri limită de funcționare: cu înfășurarea secundară legată în scurtcircuit și cu înfășurarea secundară în gol.

Datorită impedanței mari a înfășurării secundare funcționarea în scurtcircuit reprezintă un regim normal, curentul de magnetizare I_0 fiind practic neglijabil, iar cel secundar i avînd o valoare bine definită determinată din relațiile (5.2) și (5.3):

$$i = \frac{I}{n_{TC}} = \frac{N}{n} \cdot I. \qquad (5.4)$$

Dimpotrivă, la funcționarea în gol (cu înfășurarea secundară deschisă) curentul secundar este nul ($i = 0$) și conform relației (5.1) rezultă $I = I_0$.

Așadar, curentul primar devine în întregime curent de magnetizare, ceea ce are ca efect apariția în miezul magnetic a unui flux magnetic exagerat de mare.

Consecințele unui flux magnetic foarte mare sînt următoarele:

— încălzirea inadmisibilă a miezului magnetic datorită sporirii considerabile a pierderilor prin curenți turbionari (Foucault) și prin fenomenul de histerezis (se produce „arderea fierului");

— inducerea în înfășurarea secundară a unei tensiuni electromotoare mari (de ordinul miilor de volți) care este periculoasă atît pentru aparate, dar mai ales pentru personalul de exploatare (v. paragraful E).

Rezultă deci că înfășurările secundare ale transformatoarelor de curent nu trebuie lăsate în gol *nici chiar pentru un timp scurt*, atunci cînd se conectează sau se deconectează aparatele în circuitul secundar.

Atenție! Deoarece prezintă pericol pentru securitatea personalului de exploatare, operațiile în secundarul transformatoarelor de curent TC (reprezentate simbolic ca în figura 5.3) se efectuează astfel:

În raport cu situația normală de funcționare (fig. 5.3, *a*) dacă se dorește, de exemplu înlocuirea aparatului (releului) R_1 se scurtcircuitează transformatorul de curent prin puntea (scurtcircuitor) P (fig. 5.3, *b*) se deconectează aparatul R_1 și se conectează aparatul R_2 (fig. 5.3, *c*) și apoi se scoate puntea P (fig. 5.3, *d*).

În figura 5.4, *a*, *b*, *c*, *d*, *e* sînt indicate cinci moduri de simbolizare pentru transformatoarele de curent. Se precizează că simbolul din figura 5.4, *a* este cel standardizat.

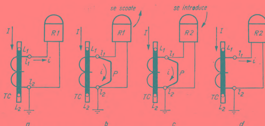


Fig. 5.3. Înlocuirea aparatelor în circuitele transformatoarelor de curent:
a — funcționare normală; *b* — scurtcircuitarea transformatorului; *c* — înlocuirea aparatelor; *d* — scoaterea scurtcircuitării.

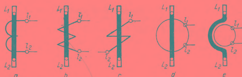


Fig. 5.4. Diverse moduri de simbolizare ale transformatorului de curent.

C. CARACTERISTICI

În afara caracteristicilor constructive prezentate, transformatoarele de curent mai sînt definite și pe baza următoarelor caracteristici principale:

Tensiunea nominală. În țara noastră se construiesc în producție de serie transformatoare de curent pentru următoarele tensiuni nominale: 10, 20, 35, 110, 220 și 400 kV.

● **Curentul nominal primar.** Se construiesc transformatoare pentru o mare varietate de valori nominale ca, de exemplu: 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1 000, 1 250, 1 500 ... 6 000 A.

● **Curentul secundar nominal.** După cum s-a arătat acest parametru are valoarea standardizată de 5 A pentru tensiunile de pînă la 110 kV inclusiv și de 1 A pentru tensiunile mai înalte: 220, 400 kV etc.

● **Numărul înfășurărilor secundare.** Un transformator de curent are de obicei două, trei sau patru înfășurări (bobine) secundare, bobinate pe tot atîtea miezuri magnetice individuale realizate ca în figura 5.5, *a* și simbolizate ca în figura 5.5, *b*.

● **Raportul de transformare.** Este definit ca raportul n_{TC} al curenților nominali primar I_n respectiv secundar i_n:

$$n_{TC} = \frac{I_n}{i_n} \tag{5.4}$$

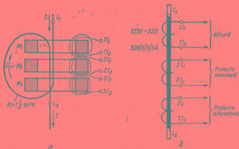


Fig. 5.5. Transformator de curent cu înfășurări secundare multiple:
a — realizare constructivă; *b* — simbol.

Observație. Odată cu indicarea raportului de transformare se evidențiază și numărul înfășurărilor secundare. De exemplu: transformator CESU—220—4 × 300/5 A sau CESU—220—300/5/5/5/5 A.

● **Eroarea de curent.** Se notează cu ε_I și reprezintă eroarea de transformare a valorilor efective (module) ale curenților primar și secundar, fiind definit pe baza relației (5.1) prin următoarea expresie:

$$\varepsilon_I = \frac{n_{TC} i - I}{I} \cdot 100(\%). \tag{5.5}$$

Eroarea de curent se definește în raport cu impedanța secundară $Z_s(\Omega)$ sau sarcina secundară S (VA) între cele două mărimi existînd relația:

$$S = Z_s \cdot i_n^2 (\mathrm{VA}). \tag{5.6}$$

De exemplu, un transformator de curent de 5 A avînd impedanța secundară de 1,2Ω va avea o sarcină secundară:

$$S = 1{,}2 \times 5^2 = 30 \text{ VA}.$$

Eroarea de curent admisă în condiții nominale de funcționare, adică la sarcină nominală, pînă la limita superioară a domeniului de măsurare poartă numele de **clasă de precizie.** Valorile standardizate ale clasei de precizie sînt: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3; 5 și 10.

Observație. Dacă sarcina secundară depășește valoarea nominală erorile de măsurare cresc, transformatorul respectiv corespunzînd unei clase de precizie mai slabe. De exemplu, același transformator de curent poate avea clasele de precizie: 0,5 pentru $Z_s = 0{,}6\Omega$ ($S = 15$ VA) sau 1 pentru $Z_s = 1\Omega$ ($S = 25$ VA) sau 3 pentru $Z_s = 2\Omega$ ($S = 50$ VA) etc.

● **Eroarea de unghi.** Transformatoarele de curent nu sînt transformatoare ideale, relația (5.2) fiind aproximativă. În realitate datorită curentului de magnetizare I_0 (v. relația 5.1) care are faza diferită de ceilalți curenți, curentul secundar i' raportat la primar:

$$i' = n_{TC} i \tag{5.7}$$

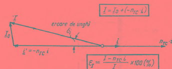


Fig. 5.6. Eroarea de unghi ε_I la transformatorul de curent.

va fi diferit în raport cu I nu numai ca modul (mărime) (v. relația 5.5) ci și ca fază. Considerînd curentul i' cu semn schimbat adică rotit cu 180° el nu va fi în fază cu curentul I (fig. 5.6) ci va avea un mic unghi δ_I numit *eroare de unghi*. Erorile nominale de unghi sînt de obicei cuprinse între 0,2′ și 1°.

● **Eroarea compusă** este o mărime caracteristică, specifică transformatoarelor de curent destinate alimentării releelor și se definește în regim permanent ca valoarea eficace* a diferenței dintre valorile instantanee ale curentului secundar i_i' (raportat la primar) și ale curentului primar I_i. Eroarea compusă ε_c este exprimată în general în procente din valoarea eficace a curentului primar I, deci în definitiv, rezultă din formula:

$$\varepsilon_c = \frac{100}{T}\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (i_i' - I_i)^2 \cdot dt}\quad [\%]. \tag{5.8}$$

Cu ajutorul noțiunii de eroare compusă se definește indicele de clasă (sau clasa de precizie) a transformatoarelor de curent pentru protecție urmat de litera P (P = protecție). Clasele normale de precizie ale transformatoarelor de curent pentru protecție sînt 5 P sau 10 P, acestea corespunzînd deci erorii compuse de 5% respectiv 10%.

● **Caracteristica de supracurent.** În domeniul supracurenților adică al curenților ce depășesc valorile nominale, caracteristicile de funcționare ale unui transformator de curent sînt cel mai bine ilustrate prin curba care reprezintă variația curentului secundar i în funcție de raportul dintre curentul primar real I și curentul primar nominal I_n (fig. 5.7). Astfel, de exemplu, raportul $I/I_n = 1, 2, \ldots 5 \ldots 10$ (numit uneori și curent primar, exprimat în unități relative) arată de fapt valoarea multiplului curentului nominal. Această curbă avînd aceeași formă ca și caracteristica de magnetizare [$B = f(H)$] se numește *caracteristica de supracurent* și este valabilă pentru o anumită sarcină secundară. Un transformator de curent ideal ar trebui să aibă caracteristica *1*, adică o dreaptă trecînd prin originea axelor (fig. 5.7), dar în realitate caracteristica de supracurent are forma *2* la care, practic, peste o anumită valoare a raportului I/I_n curentul secundar real i se abate de la valoarea teoretică I/n_{TC}, curba prezentînd un fenomen de saturație.

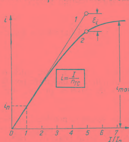


Fig. 5.7. Caracteristica de supracurent.

* Se reamintește că valoarea eficace I_e a unui curent alternativ de valoare instantanee i și perioada T este dată de expresia:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 \cdot dt}\,.$$

Această abatere nu reprezintă altceva decît eroarea de curent ε_i definită mai înainte şi care creşte brusc în zona de saturaţie a miezului transformatorului.

● **Coeficientul de saturaţie.** Valoarea maximă a raportului I/I_n pentru care transformatorul respectă limitele privind eroarea compusă se numeşte *coeficient de saturaţie* sau *factor limită de precizie* şi se notează cu n:

$$n = \frac{I_{max}}{I_n} \Rightarrow \varepsilon_c < \varepsilon_{c\,max}.$$

Exemplu. Care este valoarea minimă a curentului secundar al unui transformator de curent de 400/5 A avînd coeficientul de saturaţie $n = 8$ şi o eroare compusă $\varepsilon_c = 5\%$?

Răspuns:

Curentul nominal primar fiind $I_n = 400$ A, curentul primar de saturaţie va fi:

$$I_{max} = n \cdot I_n = 8 \times 400 = 3\,200 \text{ A}.$$

Valoarea curentului secundar ideal va fi:

$$i_0 = \frac{I_{max}}{n_{TC}} = \frac{3\,200}{400/5} = 40 \text{ A}.$$

Valoarea curentului real i va fi:

$$i = (1 - \varepsilon_c)\, i_0 = \left(1 - \frac{5}{100}\right) 40 = 38 \text{ A}.$$

Valorile normate ale coeficienţilor de saturaţie sînt: 5, 10, 15, 20 şi 30.

Transformatoarele de curent pentru măsurare se construiesc de obicei pentru $n < 5$ şi clasa de precizie 0,5 sau 3, în timp ce transformatoarele de curent destinate protecţiei se realizează pentru $n = 10$ ... 30, iar clasa de precizie este, după cum s-a arătat, 5 *P* sau 10 *P*. Unele transformatoare de curent destinate protecţiilor diferenţiale sau numai unele înfăşurări din cadrul unor asemenea transformatoare posedă indicativul special *D*, ceea ce indică, de exemplu, că $\varepsilon_i < 10$ şi $n > 20$ ... 30, la sarcina nominală a transformatorului.

În figura 5.8 se prezintă curba erorilor de 10% pentru un transformator din clasa *D* (de fapt curba de variaţie a coeficientului de saturaţie n în funcţie de impedanţa secundară Z_s), curbă ce se indică prin cataloagele de fabrică.

Ţinînd seamă de caracteristicile prezentate indicativul complet al unui transformator de curent poate fi de exemplu: *CESU*—110—600/5/5 A—0,5/D/3—15/60/30 VA.

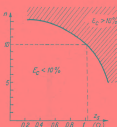


Fig. 5.8. Caracteristica erorilor de 10% la un transformator din clasa 10*P*.

2. Marcarea bornelor transformatoarelor de curent

Pentru legarea corectă a transformatoarelor de curent în circuitul primar precum şi pentru legarea la bornele circuitelor secundare a apa-

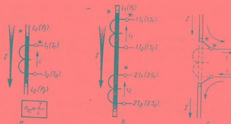


Fig. 5.9. Marcarea înfășurărilor transformatoarelor de curent:
a — cu o înfășurare secundară; *b* — cu mai multe înfășurări secundare; *c* — regula de asociere a bornelor polarizate.

ratelor de măsurare și a releelor la care are importanță sensul de circulație al puterii (contoare, relee direcționale etc.), bornele înfășurărilor transformatoarelor de curent sînt marcate pe baza unei anumite convenții.

La transformatoarele de curent de fabricație românească, bornele înfășurării primare se notează cu L_1 sau P_1 (începutul înfășurării) și cu L_2 sau P_2 (sfîrșitul înfășurării), iar bornele înfășurării secundare, cu l_1 sau S_1 (începutul înfășurării) și cu l_2 sau S_2 (sfîrșitul înfășurării). Începutul înfășurărilor se mai numește uneori și *bornă polarizată* și se notează cu o steluță (*) (fig. 5.9, *a*).

În cazul în care transformatorul are mai multe înfășurări secundare, înaintea literelor respective sînt scrise cifrele 1 ... 4 în funcție de numărul înfășurărilor (fig. 5.9, *b*). Curentul primar *I* circulă de la borna L_1 spre L_2 (intră prin borna polarizată), în timp ce curentul secundar *i* circulă prin înfășurarea secundară de la l_2 spre l_1 (iese prin borna polarizată) sau altfel spus, circulă prin sarcina exterioară Z_s (releu etc.) de la l_1 spre l_2.

Pentru determinarea sensului de circulație a curenților se poate recurge la următoarea regulă simplă (fig. 5.9, *c*): aparatul sau releul se leagă la bornele înfășurării secundare, astfel încît sensul de circulație a curentului prin bobina aparatului să fie același ca și cum acesta ar fi legat direct în circuitul primar.

La transformatoarele de curent la care nu se cunosc bornele polarizate, acestea pot fi determinate cu ajutorul unui montaj ca cel din figura 5.10, folosind o sursă de tensiune continuă *E*, un întreruptor *T* și un miliampermetru (galvanometru) de curent continuu *A*.

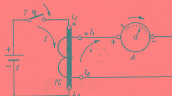


Fig. 5.10. Schema pentru determinarea polarității înfășurărilor secundare.

Aplicînd brusc curentul continuu, prin închiderea întreruptorului *T*, astfel ca curentul *I* să intre prin borna L_1, borna corespunzătoare secundară l_1 va fi aceea pentru care acul galvanometrului va devia spre dreapta dacă borna de plus (+) a aparatului va fi legată la borna secundară respectivă.

Observație. Dacă miliampermetrul deviază spre dreapta la deschiderea întreruptorului T, atunci borna polarizată este aceea legată la minusul (—) aparatului de măsurare.

3. Schemele de conectare ale transformatoarelor de curent

Pentru conectarea releelor și a altor aparate de măsurare înfășurările secundare ale transformatoarelor de curent se pot conecta în diverse scheme (fig. 5.11), dintre care se descriu pe scurt cele mai uzuale.

În figura 5.11 sînt indicate și punctele în care trebuie efectuată legătura de protecție la pămînt a înfășurărilor secundare (v. par. E).

Observație. Pe circuitele secundare ale transformatoarelor de curent *nu se montează siguranțe.*

● **Schema de conectare în stea completă a transformatoarelor de curent și a releelor** (fig. 5.11, *a*) folosește trei transformatoare de curent *1TC, 2TC* și *3TC*. Prin bobinele releelor R_A, R_B și R_C circulă curenți secundari de fază:

$$i_R = \frac{I_R}{n_{TC}}; \quad i_S = \frac{I_S}{n_{TC}}; \quad i_T = \frac{I_R}{n_{TC}},$$

iar prin conductorul de nul circulă suma fazorială (vectorială) a celor trei curenți de fază care, după cum se știe, reprezintă triplul curentului homopolar i_h:

$$3i_h = \underline{i}_R + \underline{i}_S + \underline{i}_T = \frac{1}{n_{TC}}(\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T). \tag{5.9}$$

În această schemă releele legate pe faze sînt sensibile la toate felurile de defecte (scurtcircuite), iar releul R_0 montat pe conductorul de nul sesizează numai scurtcircuitele monofazate; din această cauză schema respectivă este folosită în rețelele cu punctul neutru legat direct la pămînt (110, 220, 400, 750 kV).

● **Schema de conectare în triunghi a transformatoarelor de curent și în stea a releelor** (fig. 5.11, *b*) folosește tot trei transformatoare de curent. Releele R_A, R_B și R_C sînt parcurse de curenții $\underline{i}_A$, $\underline{i}_B$ și $\underline{i}_C$ care depind de curenții de fază i_R, i_S și i_T conform relațiilor (fig. 5.12):

$$|\underline{i}_A| = |\underline{i}_R - \underline{i}_S| = \sqrt{3}\,i; \quad |\underline{i}_B| = |\underline{i}_S - \underline{i}_T| = \sqrt{3}\,i; \quad |\underline{i}_C| = |\underline{i}_T - \underline{i}_R| = \sqrt{3}\,i.$$

Observație. Din fig. 5.12 se constată că curenții prin relee sînt nu numai cu $\sqrt{3}$ ori mai mari decît curenții prin transformatoare, ci și defazați cu 30° înainte față de aceștia.

Curentul de secvență homopolară i_h se închide prin înfășurările legate în triunghi, astfel că la scurtcircuitele monofazate, prin relee nu circulă decît componenta directă și inversă a curentului de scurtcircuit. Această schemă se folosește la protecția diferențială sau la protecțiile maximale de curent atunci cînd se dorește mărirea sensibilității protecției la defecte după transformatoare de putere cu conexiunea stea-triunghi.

● **Schema de conectare a transformatoarelor de curent în filtrul de curent de secvență homopolară** — filtrul Holmgreen (fig. 5.11, c), se realizează cu

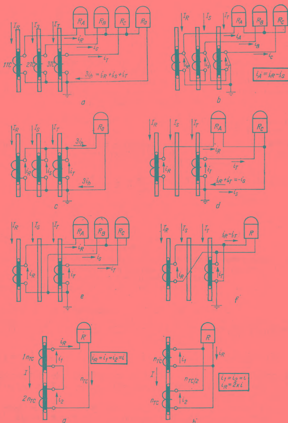


Fig. 5.11. Scheme de conectare ale transformatoarelor de curent:

a — în stea completă; *b* — în triunghi; *c* — în filtru Holmgreen; *d* — în stea incompletă a transformatoarelor de curent și a releelor; *e* — în stea incompletă a transformatoarelor de curent și în stea completă a releelor; *f* — în montaj diferențial; *g* — cu două transformatoare în serie; *h* — cu două transformatoare în paralel.

înfășurările secundare ale transformatoarelor de curent de pe cele trei faze legate în paralel și cu releul de curent R_0 înseriat pe conductorul care unește bornele lor. În regim de funcționare normală și în cazul scurtcircuitelor polifazate suma curenților pe cele trei faze este teoretic * nulă. În cazul punerilor la pămînt sau al scurtcircuitelor monofazate, apare un curent de secvență homopolară (v. relația 5.9) care străbate releul R_0.

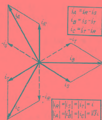


Fig. 5.12. Diagrama fazorială a curenților din transformatoarele de curent la conectarea în triunghi.

Observație. Această schemă este de fapt identică cu cea din figura 5.11, *a* din care s-au eliminat (șuntat) releele de fază R_A, R_B și R_C.

● **Schema de conectare în stea incompletă a transformatoarelor de curent și a releelor** (fig. 5.11, *d*) se realizează cu două transformatoare și cu relee pe două faze (de obicei fazele R și T). Prin conductorul de întoarcere circulă curentul (fig. 5.12):

$$\underline{i}_{0S} = -\frac{1}{n_{TC}}(\underline{I}_R + \underline{I}_T) = \frac{\underline{I}_S}{n_{TC}} = \underline{i}_S \tag{5.10}$$

Această schemă se aplică la rețele cu neutrul izolat sau legat la pămînt prin bobina de stingere (10, 20, 35 kV).

● **Schema de conectare în stea incompletă alimentînd trei relee legate în stea completă** (fig. 5.11, *e*) este similară celei precedente, cu observația că pe conductorul de întoarcere pe care circulă curentul i_S se montează cel de al treilea releu, R_B.

● **Schema de conectare a două transformatoare în montaj „diferențial transversal"** numită uneori și schema de legare „în opt" alimentînd un singur releu (fig. 5.11, *f*). Schema ** se folosește de obicei la protecția motoarelor împotriva scurtcircuitelor polifazate. Curentul prin releul R este (v. fig. 5.12 *c*):

$$\underline{i} = \underline{i}_R - \underline{i}_T = \frac{1}{n_{TC}}(\underline{I}_R - \underline{I}_T). \tag{5.11}$$

După cum rezultă din figura 5.12, în regim normal de funcționare precum și la scurtcircuit trifazat diferența fazorială $\underline{i}_R - \underline{i}_T$ este de $\sqrt{3}$ ori mai mare decît curentul pe fază $[|\underline{i}_R - \underline{i}_T| = \sqrt{3}\,i.]$

În cazul scurtcircuitului bifazat curentul ce străbate schema va fi:

— la scurtcircuit $R-S$ sau $S-T$:

$$i = i_R = i_T$$

— la scurtcircuit $R-T$:

$$i = 2i_R.$$

* În realitate circulă un *curent de dezechilibru* datorat neidentității celor trei transformatoare.

** Circuitul format din cele două înfășurări secundare împreună cu legăturile lor este asemănător cifrei 8.

● **Schema cu două transformatoare de curent identice legate în serie** (fig. 5.11, *g*) asigură o dublare a sarcinii secundare ($2Z_s$) raportul de transformare rămînînd același (n_{TC}) cu al fiecărui transformator.

● **Schema cu două transformatoare de curent identice legate în paralel** (fig. 5.11, *h*) asigură o reducere la jumătate a raportului de transformare ($n_{TC}/2$), în schimb prezintă dezavantajul reducerii la jumătate și a sarcinii secundare ($Z_s/2$).

4. Încărcarea transformatoarelor de curent

După cum s-a arătat, pentru asigurarea unei anumite clase de precizie la un anumit coeficient de saturație n este necesar să nu se depășească o anumită valoare nominală a impedanței de sarcină Z_{sn} (de exemplu pentru un anumit transformator de curent la $\varepsilon_c = 5$ și $n = 20$, se admite $Z_{sn} = 1,2\ \Omega$, respectiv o putere de 30 VA).

În cazul folosirii unui singur transformator de curent *TC* (fig. 5.13, *a*) notînd cu Z_A impedanța releelor și cu Z_L impedanța unui conductor de legătură, impedanța de sarcină rezultă:

$$Z_S = Z_A + 2Z_L. \tag{5.12}$$

Pentru alte scheme de legare a transformatoarelor de curent și a releelor, impedanța secundară efectivă a transformatoarelor nu mai rezultă așa de simplu, ci se stabilește pentru fiecare schemă în parte.

Astfel, de exemplu, pentru schema din figura 5.13, *b* sarcina secundară la bornele unui transformator este:

— la scurtcircuit polifazat: $Z_S = Z_L + Z_A$;

— la scurtcircuit monofazat: $Z_S = 2Z_L + Z_A + Z_0$ etc.

Instrucțiunile de proiectare prevăd schemele de calcul al impedanțelor de sarcină a transformatoarelor de curent pentru diverse montaje și diverse tipuri de defect.

Observație. Între coeficientul de saturație normal n garantat la sarcina nominală Z_{sn} și coeficientul de saturație n' la altă sarcină secundară Z'_s pentru a se asigura aceeași clasă de precizie, există relația:

$$n' \cdot Z'_s = n \cdot Z_{sn}. \tag{5.13}$$

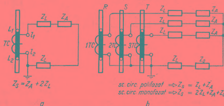


Fig. 5.13. Schema de încărcare a transformatoarelor de curent:
a — cu un singur transformator; *b* — cu trei transformatoare.

Această relaţie permite sporirea coeficientului de saturaţie prin reducerea corespunzătoare a sarcinii secundare. De exemplu, dacă se dispune de un transformator de curent avînd $n = 10$ în clasa de precizie 1 pentru $Z_{sn} = 1{,}2\ \Omega$, el poate fi folosit într-o instalaţie în care curentul de scurtcircuit este de 12 ori mai mare ca cel nominal ($n' = 12$), cu condiţia reducerii sarcinii secundare la valoarea Z'_s (relaţia 5.13):

$$Z'_s = \frac{n \cdot Z_{sn}}{n'} = \frac{10 \times 1{,}2}{12} = 1\,\Omega$$

C. TRANSFORMATOARE DE TENSIUNE INDUCTIVE

1. Construcţie, funcţionare, caracteristici

● **Construcţie.** Transformatorul de tensiune inductiv cuprinde un miez magnetic M (fig. 5.14) o înfăşurare primară B avînd un număr de spire N relativ mare şi o înfăşurare (sau mai multe) secundară cu un număr de spire n relativ mic.

Înfăşurarea primară se leagă în paralel cu circuitul primar fiind racordată la tensiunea U, iar înfăşurarea secundară alimentează cu tensiunea u aparatele de măsurare V_1, V_2 ... sau releele R_1, R_2 ... (sarcina secundară) legate în derivaţie. Miezul magnetic şi cele două înfăşurări sînt introduse într-o carcasă, avînd izolaţia de ulei sau răşină şi prevăzută cu izolatoare de racordare.

Constructiv, transformatoarele de tensiune inductive pot fi: monopolare, bipolare sau tripolare prevăzute deci cu 1, 2 sau respectiv 3 izolatoare şi pentru diverse tensiuni nominale (10, 20, 35, 110, 220, 400 kV).

În funcţie de caracteristicile lor constructive transformatoarele de tensiune inductive de fabricaţie românească se notează de obicei cu patru simboluri literale, avînd semnificaţiile de mai jos, urmate de un număr ce indică tensiunea nominală:

T — transformator de tensiune (inductiv) *;
I — pentru montaj interior;
E — pentru montaj exterior;
R — cu izolaţie de răşină;
U — cu izolaţie de ulei;
M — monopolar;
B — bipolar;
T — tripolar.

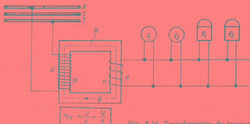


Fig. 5.14. Transformator de tensiune inductiv.

* Acest simbol T apare la începutul notaţiei spre deosebire de simbolul T = tripolar

Exemplu de notare: *TIRM*-20 — transformator de tensiune (*T*), pentru montaj interior (*I*) cu izolație de rășină (*R*), monopolar (*M*) cu tensiunea nominală de 20 kV (20).

● **Funcționare.** Prin opoziție cu transformatoarele de curent care funcționează practic în regim de scurtcircuit, transformatoarele de tensiune funcționează, practic, în regim de mers în gol deoarece impedanțele de sarcină din secundar au valori foarte mari. Acest lucru este posibil de realizat prin faptul că, constructiv, un transformator de tensiune funcționează cu miezul nesaturat și cu o inducție foarte redusă adică, avînd de exemplu sarcina secundară de 150 VA, posedă un miez magnetic corespunzător unui transformator de putere de 2 000—3 000 VA.

Considerînd transformatorul de tensiune ideal, funcționînd în gol cu un curent de magnetizare I_0 neglijabil, se definește raportul de transformare n_{TT} ca raportul tensiunilor nominale primare U_n și respectiv secundară u_n:

$$n_{TT} = \frac{U_n}{u_n} \approx \frac{N}{n}. \qquad (5.14)$$

Întrucît tensiunea secundară este, practic, întotdeauna 100 V ($U_n = 100$ V), raportul de transformare are de obicei valori ridicate ($n_{TT} = 60 \dots 4\,000$).

● **Caracteristici.** În afara caracteristicilor constructive, transformatoarele de tensiune mai sînt definite și pe baza următoarelor caracteristici principale:

Tensiunea nominală primară. În țara noastră se construiesc în producția de serie transformatoare de tensiune pentru următoarele valori nominale: 6, 10, 15, 20, 35, 110, 220 și 400 kV.

Observație. Deoarece tensiunile nominale indicate mai sus sînt cele între faze, rezultă că ele sînt valabile pentru transformatoarele bipolare (care se leagă între faze), în schimb pentru transformatoarele monopolare sau tripolare (care se leagă între fază și pămînt) tensiunile sînt cele pe fază. De exemplu: $6/\sqrt{3}$; $10/\sqrt{3}$ kV — $400/\sqrt{3}$ kV, respectiv $3\times 6/\sqrt{3}$ kV... $3\times 15/\sqrt{3}$ kV.

Tensiunea nominală secundară. După cum s-a arătat, acest parametru are valoarea standardizată de 100 V între faze, respectiv $100/\sqrt{3}$V pe fază.

Numărul înfășurărilor secundare. Un transformator de tensiune are de obicei două înfășurări (bobine) secundare:

— prima înfășurare secundară (înfășurarea principală) pentru obținerea tensiunilor de măsurare pe fază și între faze; tensiunea acestei înfășurări este de 100 V la transformatoarele bipolare și de $100/\sqrt{3}$ V la cele monopolare și tripolare;

— a doua înfășurare secundară (înfășurarea auxiliară) necesară realizării „triunghiului deschis“ care asigură filtrarea componentei homopolare de tensiune (3 U_0); tensiunea acestei înfășurări este de 100/3 V la transformatoarele de tensiune aferente rețelelor cu nulul izolat sau compensat (6, 10, 15, 20 și 35 kV) și de 100 V la transformatoarele din rețelele cu nulul legat direct la pămînt (110, 220, 400 și 750 kV).

Raportul de transformare. Este definit ca raportul n_{TT} al tensiunilor nominale primară U_n respectiv secundară u_n:

$$n_{TT} = \frac{U_n}{u_n}.$$

Observație. Odată cu indicarea raportului de transformare se evidențiază și tipul transformatorului respectiv. De exemplu: transformatorul *TIRB*—20—20/0,1 kV arată că este vorba de un transformator bipolar nu numai din indicativul *B*, ci și din faptul că raportul de transformare este indicat de tensiunile între faze, sau *TEMU* 110 — $3\times\frac{110}{\sqrt{3}}/\frac{0,1}{\sqrt{3}}$/0,1 kV indică, similar, că sînt trei transformatoare monofazate constituind un transformator trifazat.

Eroarea de tensiune. Se notează cu ε_U și reprezintă eroarea de transformare a valorilor efective (module) ale tensiunilor primare U și secundare u, fiind definită pe baza relației următoare:

$$\varepsilon_U = \frac{n_{TT}u - U}{U}\cdot 100(\%). \tag{5.15}$$

Ca și în cazul transformatoarelor de curent, eroarea de tensiune admisă în condiții nominale de funcționare, adică la sarcină nominală și în domeniul de 5—120% U_n se numește **clasă de precizie.** Transformatoarele de tensiune se construiesc pentru următoarele clase de precizie: 0,1; 0,2; 0,5; 1 și 3. Clasele de precizie 0,1, 0,2 și 0,5 sînt destinate în special aparatelor de măsurare iar clasele 1 și 3 se folosesc pentru releele de protecție. La înfășurările alocate pentru protecție, clasa de precizie se indică prin eroarea maximă admisibilă exprimată în procente, urmată de litera *P* (protecție); de exemplu: 3*P*.

În prospectele transformatoarelor de tensiune și pe eticheta de fabricație este indicată pentru fiecare clasă de precizie și puterea maximă admisibilă de sarcină, pentru care este garantat transformatorul. De exemplu, la transformatoarele *TEMU 20* sau *35* clasei 0,5 îi corespunde puterea de 90 VA, clasei 1 puterea de 180 VA, iar clasei 3 puterea de 300 VA.

Din relația de calcul a impedanței secundare:

$$Z_s = \frac{u^2}{S}\quad (\Omega) \tag{5.16}$$

tensiunea secundară u fiind exprimată în volți iar puterea S în volt amperi (VA), rezultă că pentru o putere maximă admisibilă rezultă o impedanță secundară minimă admisibilă. De exemplu pentru un transformator de tensiune avînd u = 100 V și S = 90 VA, rezultă că impedanța secundară echivalentă a tuturor aparatelor de măsurare și a releelor montate în paralel nu poate scădea sub valoarea:

$$Z_s = \frac{100^2}{90} = 1\,100\ \Omega = 1{,}1\ \text{k}\Omega$$

Eroarea de unghi reprezintă unghiul de defazaj între fazorul tensiune primară U și fazorul tensiune secundară u rotit cu 180° și se notează cu δ_U. La transformatoarele de tensiune erorile de unghi uzuale au valorile δ_U = = 10 ... 40′.

2. Marcarea bornelor transformatoarelor de tensiune inductive

În scopul legării corecte a transformatoarelor de tensiune la circuitul primar precum și pentru legarea corectă la bornele secundare ale aparatelor de măsurare inclusiv ale releelor, se adoptă marcarea bornelor înfășurărilor primare și secundare pe baza unei anumite convenții. La transformatoarele

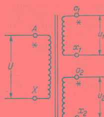


Fig. 5.15. Marcarea bornelor la transformatoarele de tensiune inductive.

de tensiune de fabricație românească bornele înfășurării primare se notează cu litera A — începutul înfășurării (borna polarizată) și cu litera X — sfîrșitul înfășurării, iar bornele înfășurărilor secundare corespunzătoare cu litera a, respectiv cu x. În cazul a două înfășurări secundare acestea se notează: înfășurarea principală cu a_1 și x_1, iar cea auxiliară cu a_2 și x_2 (fig. 5.15).

La transformatoarele de tensiune la care nu se cunosc bornele polarizate, acestea pot fi determinate cu același montaj ca cel din figura 5.10, cu observația că în locul miliampermetrului de curent continuu se poate folosi un voltmetru.

3. Schemele de conectare ale transformatoarelor de tensiune

În practică transformatoarele de tensiune pot fi folosite în diferite scheme de conectare (fig. 5.16), în funcție de necesitățile energetice.

Fig. 5.16. Schemele de conectare ale transformatoarelor de tensiune:
a — cu un transformator bipolar; *b* — cu două transformatoare bipolare (montajul în V); *c* — cu trei transformatoare monopolare; *d* — cu un transformator de tensiune trifazat și miez magnetic cu trei coloane; *e* — cu un transformator monopolar.

În figura 5.16 sînt indicate și locul de plasare a siguranțelor fuzibile F precum și modul cum trebuie executată legătura de protecție la pămînt a înfășurărilor secundare.

● **Schema cu un singur transformator de tensiune bipolar** (fig. 5.12, *a*) se aplică numai la rețelele cu punctul neutru izolat (6—35 kV) cînd pentru măsurare, protecție sau automatizare este necesară o singură tensiune între faze. Soluția respectivă se adoptă de obicei pe linii sau cabluri cînd este necesară verificarea prezenței tensiunii pe linia respectivă, întreruptorul propriu fiind deschis.

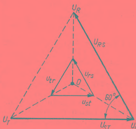


Fig. 5.17. Diagrama fazorială a tensiunilor la montajul în V.

● **Schema cu două transformatoare de tensiune bipolare** (fig. 5.16, *b*) cunoscută și sub numele de **conexiune (montaj) în „V"** se aplică de asemenea numai la rețelele cu neutrul izolat cînd sînt necesare toate cele trei tensiuni între faze. Această soluție se adoptă de obicei pentru generatoarele de puteri relativ mici (2—12 MVA) care debitează direct pe barele colectoare.

Observație. Denumirea de conexiune în V rezultă din poziția relativă a fazorilor tensiunilor primare și secundare de pe cele două transformatoare (fig. 5.17), care constituie litera V.

● **Schema cu trei transformatoare de tensiune monopolare** (fig. 5.16, *c*) se aplică la orice categorie de rețea din punctul de vedere al tratării neutrului, cu mențiunea că rapoartele de transformare vor fi, de exemplu:

$$n_{TT} = 3 \times \frac{6}{\sqrt{3}} \Big/ \frac{0,1}{\sqrt{3}} \Big/ \frac{0,1}{3} \text{ kV (rețea cu neutrul izolat)}$$

sau:

$$n_{TT} = 3 \times \frac{220}{\sqrt{3}} \Big/ \frac{0,1}{\sqrt{3}} \Big/ 0,1 \text{ kV (rețea cu neutrul legat la pămînt).}$$

Justificarea tensiunii adoptate pentru înfășurarea auxiliară (triunghiul deschis) rezultă din figura 5.18. Astfel, de exemplu, în cazul unei puneri la pămînt a fazei S într-o rețea cu neutrul izolat (fig. 5.18, *a*) faza respectivă capătă potențialul pămîntului, iar tensiunile de pe fazele R și T cresc la valoarea tensiunii compuse (între faze).

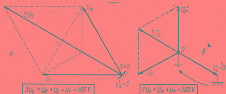


Fig. 5.18. Diagrama fazorială a tensiunilor la punerea monofazată la pămînt: *a* — în rețea cu neutrul izolat; *b* — în rețea cu neutrul legat la pămînt.

Ca urmare, tensiunea $3U_0$ obținută la bornele triunghiului deschis va avea valoarea maximă:

$$3U_0 = U_{RS} + U_{ST} = 3U_f,$$

adică așa cum se observă din figura 5.18, *a*, ea va avea valoarea triplă a tensiunii pe fază ($3U_f$). Întrucît se dorește ca tensiunea maximă obținută să aibă valoarea standard de 100 V, rezultă că este necesar ca tensiunea obținută pe o înfășurare auxiliară să fie de 100/3 V.

În cazul unei rețele cu neutrul legat la pămînt, la o punere la pămînt, de exemplu a fazei *S* (fig. 5.18, *b*), acesta reprezintă de fapt un scurtcircuit monofazat. Potențialul punctului neutru își păstrează aceeași poziție, în centrul triunghiului fazorilor de tensiune, tensiunea minimă a fazei *S* devine nulă, iar tensiunea $3U_0$ obținută la bornele triunghiului deschis va avea valoarea maximă:

$$3U_0 = U_{R0} + U_{T0} = U_f,$$

adică așa cum se observă din figura 5.18, *b*, ea va avea valoarea tensiunii pe fază U_f (100 V).

● **Schema cu transformator de tensiune trifazat avînd miezul magnetic cu trei coloane și înfășurări auxiliare** (fig. 5.16, *d*) este similară din punct de vedere electric cu schema precedentă (fig. 5.16, *c*), cu observația că se utilizează un singur transformator trifazat. Aceste tipuri de transformatoare se construiesc pentru tensiuni primare de 6, 10 și 15 kV, adică pentru rețele cu neutrul izolat.

● **Schema cu un transformator de tensiune trifazat avînd miezul magnetic cu cinci coloane și înfășurări auxiliare amplasate pe coloanele laterale** se realizează de asemenea pentru rețele cu neutrul izolat avînd tensiunile primare de 6, 10 și 15 kV.

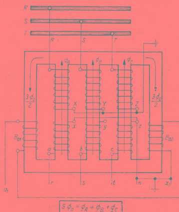


Fig. 5.19. Construcția transformatorului de tensiune trifazat cu miez magnetic cu cinci coloane.

Constructiv, transformatorul de tensiune trifazat avînd miezul magnetic cu cinci coloane se prezintă ca în figura 5.19. Înfășurările primare precum și cele secundare principale sînt amplasate pe cele trei coloane centrale și conectate în stea, iar înfășurarea auxiliară cuprinde două bobine B_{01} B_{02} amplasate pe coloanele laterale și conectate în serie.

Rațiunea unui asemenea mod de obținere a tensiunii homopolare rezultă din faptul că fluxul homopolar $3\Phi_0$ de pe cele trei coloane centrale se ramifică sub forma a două fluxuri 3/2 Φ_0 care se închid prin coloanele laterale. În acest mod tensiunile u_{01} și u_{02} induse

în bobinele B_{01} şi respectiv B_{02} se însumează prin înseriere, astfel încît tensiunea homopolară:

$$3u_0 = u_{01} + u_{02},$$

va fi proporţională cu fluxul homopolar total $3\Phi_0$.

Observaţie. Întrucît sumele fluxurilor de secvenţă directă şi a celor de secvenţă inversă sînt nule rezultă că pe coloanele laterale va circula exclusiv fluxul de secvenţă homopolară.

Din figurile 5.16, *d* şi 5.16, *e* se observă că marcarea bornelor la transformatoarele de tensiune trifazate este următoarea: *A*, *B*, *C* şi *a*, *b*, *c* pentru începuturile înfăşurărilor (bornele polarizate) respectiv: *X*, *Y*, *Z* şi *x*, *y*, *z* pentru sfîrşiturile înfăşurărilor, folosind litere mari pentru înfăşurările primare, şi litere mici pentru cele secundare. Bornele punctelor neutre sînt marcate cu *N* respectiv *n*, iar bornele înfăşurării secundare auxiliare cu a_1 şi x_1 sau cu *da* şi *dn*.

● **Schema cu un transformator de tensiune monofazat** (fig. 5.16, *f*) se aplică numai la reţelele cu neutrul legat la pămînt (110, 220, 400 şi 750 kV) înfăşurarea primară fiind conectată la tensiunea pe fază adică între o fază şi pămînt. Această soluţie se adoptă pentru măsurarea (sau sesizarea prezenţei) tensiunii pe liniile de înaltă tensiune (110, 220, 400, 750 kV) atunci cînd întreruptorul liniei respective este deschis.

4. Executarea circuitelor transformatoarelor de tensiune

Independent de schema de conexiuni adoptată pentru transformatoarele de tensiune, executarea circuitelor secundare de la transformatoarele de tensiune pentru alimentarea releelor de protecţie şi automatizare (*PRA*) se execută în mai multe moduri în funcţie de schema circuitelor primare ale staţiei şi de necesităţile protecţiei sau automatizării respective. În cele ce urmează sînt prezentate cele mai uzuale scheme de alimentare cu tensiune alternativă.

Alimentarea din transformatoarele de tensiune ale elementului protejat (fig. 5.20) se aplică în următoarele variante:

— de la unul sau trei transformatoare monopolare (fig. 5.20, *a*); se aplică de obicei pe liniile de înaltă tensiune aferente reţelelor cu neutrul legat la pămînt (110, 220, 400 şi 750 kV);

— de la unul sau două transformatoare de tensiune bipolare (fig. 5.20, *b*); se aplică în special pe liniile sau cablurile de tensiune medie aferente reţelelor cu neutrul izolat sau compensat (6, 10, 15, 20, 35 kV);

— de la două transformatoare de tensiune bipolare montate în V (fig. 5.20, *c*); se aplică la generatoarele debitînd direct pe barele colectoare;

— de la trei transformatoare de tensiune monopolare, sau în cazul reţelelor de 6, 10 şi 15 kV de la un transformator de tensiune tripolar (trifazat). Soluţia se aplică în special la generatoarele mari (fig. 5.20, *d*) funcţionînd bloc cu transformatorul de forţă.

Alimentarea din transformatoarele de tensiune ale barelor colectoare simple (fig. 5.21, *a*) se aplică în cazul staţiilor mai puţin importante prevăzute cu sistem simplu de bare.

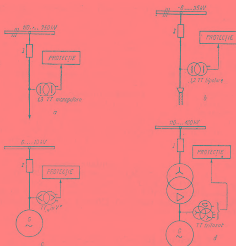


Fig. 5.20. Schema de alimentare cu tensiune de la transformatoarele elementului protejat:

a — de la un transformator monopolar; *b* — de la un transformator bipolar; *c* — de la două transformatoare bipolare; *d* — de la trei transformatoare monopolare (un transformator trifazat).

Alimentarea din transformatoarele de tensiune a barelor colectoare duble (fig. 5.21, *b*) ; soluție ce se aplică în cazul stațiilor mai mari. Se constată că pentru a primi tensiunea aferentă barei pe care este conectat circuitul primar al elementului considerat, circuitul de tensiune este trecut prin contactele auxiliare normal deschise ale separatoarelor corespunzătoare de bare.

Transformatoarele de tensiune montate pe bare sînt întotdeauna formate fie din trei elemente monopolare, fie dintr-unul tripolar (trifazat).

Înfășurările primare ale transformatoarelor de tensiune pentru 6, 10, 15, 20 și 35 kV se conectează la rețeaua de înaltă tensiune prin separatoare și siguranțe fuzibile și dacă este necesar și prin rezistențe limitatoare. Pentru tensiuni mai înalte (110, 220, 400 și 750 kV) conectarea acestora se face numai prin separatoare.

Pentru protecția transformatoarelor de tensiune pe circuitele înfășurărilor secundare se prevăd siguranțe sau întreruptoare automate cu contacte auxiliare pentru semnalizarea declanșării acestora.

Locul de plasare a siguranțelor în circuitele înfășurărilor primare și secundare este arătat în figura 5.16.

La transformatoarele de tensiune de pe bare se prevăd în plus siguranțe fuzibile și pe circuitele secundare derivate spre fiecare consumator. Arderea unei siguranțe, o întrerupere sau orice altă defecțiune care apare în circuitele

Fig. 5.21. Schema de alimentare cu tensiune de la transformatoarele barelor colectoare:
a — simple; *b* — duble.

secundare ale unui transformator de tensiune are ca efect reducerea sau dispariția tensiunii care alimentează protecția sau automatizarea elementului respectiv. În scopul evitării posibilității unei funcționări greșite a releelor de protecție și automatizare în astfel de cazuri, în circuitele secundare de tensiune se prevăd semnalizări speciale prin care se controlează integritatea circuitelor sau chiar elemente speciale de blocare ale protecției sau automatizării respective. De exemplu, se prevăd relee de blocare a protecției de distanță la arderea siguranțelor.

5. Încărcarea transformatoarelor de tensiune

Pentru asigurarea unei anumite clase de precizie ε_U în limitele de funcționare normală a transformatoarelor de tensiune (de obicei, $u = 5\% \ldots 120\%\ U_n$) este recomandată o valoare minimă a impedanței de sarcină Z_s respectiv o valoare maximă a puterii aparente debitată S (VA). Această putere este însă impusă la o anumită valoare a factorului de putere ($\cos\varphi$) (de obicei $\cos\varphi_0 = 0{,}8$). Deoarece factorul de putere este dat de relația:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{R_s}{Z_s},$$

în care P este puterea activă (W);
R_s — rezistența de sarcină, (Ω).

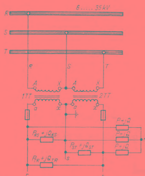


Fig. 5.22. Exemplu de schemă pentru determinarea încărcării transformatoarelor de tensiune.

rezultă că este necesar să se respecte valori limită și pentru puterea activă P și pentru cea reactivă Q. Rezultă așadar:

$$P = S \cos \varphi; \quad R_s = Z_s \cos \varphi,$$

$$Q = S \sin \varphi; \quad X_s = Z_s \sin \varphi,$$

prin X_s notîndu-se reactanța de sarcină.

De exemplu pentru un transformator de tensiune avînd $S = 300$ VA și $\cos \varphi_0 = 0{,}8$, se impune:

$$Z_s = \frac{u^2}{S} = \frac{100^2}{300} = 330\ \Omega;$$

$$R_s = Z_s \cos \varphi_0 = 330 \cdot 0{,}8 = 264\ \Omega;$$

$$X_s = Z_s \sin \varphi_0 = 330 \cdot 0{,}6 = 198\ \Omega.$$

Valorile rezultate sînt cele minime admisibile. Pentru respectarea valorii impuse a factorului de putere în circuitele consumatoare se introduc (dacă este cazul) rezistențe sau reactanțe adiționale pînă la obținerea valorilor necesare.

Pentru determinarea încărcării transformatoarelor de tensiune, respectiv pentru calculul puterilor active și reactive ce sînt absorbite de la aceste transformatoare, în cataloagele de proiectare sînt date formule de calcul pentru diversele moduri de conectare a transformatoarelor și a sarcinilor.

Ca exemplu, în figura 5.22 este arătată schema de conectare a unor sarcini în triunghi (între faze): $P_{RS} + \mathrm{j}\,Q_{RS}$; $P_{ST} + \mathrm{j}\,Q_{ST}$; $P_{TR} + \mathrm{j}\,Q_{TR}$ și a unor sarcini identice în stea: $P + \mathrm{j}\,Q$, încărcările $P_1 + \mathrm{j}\,Q_1$ și $P_2 + \mathrm{j}\,Q_2$ aferente transformatoarelor $1TT$ și $2TT$, fiind date de relațiile:

$$P_1 = P_{RS} + \frac{P_{TR} - \sqrt{3}\,Q_{TR}}{2} + \frac{3P - \sqrt{3}\,Q}{2};$$

$$P_2 = P_{ST} + \frac{P_{TR} + \sqrt{3}\,Q_{TR}}{2} + \frac{3P + \sqrt{3}\,Q}{2};$$

$$Q_1 = Q_{RS} + \frac{\sqrt{3}\,P_{TR} + Q_{TR}}{2} + \frac{\sqrt{3}\,P + 3Q}{2};$$

$$Q_2 = Q_{ST} - \frac{\sqrt{3}\,P_{TR} - Q_{TR}}{2} - \frac{\sqrt{3}\,P - 3Q}{2}.$$

D. TRANSFORMATOARE DE TENSIUNE CAPACITIVE

Pentru tensiunile de 110, 220, 400 și 750 kV au început să fie realizate transformatoare de tensiune *capacitive* (fig. 5.23) care prezintă următoarele avantaje față de transformatoare de tensiune inductive:

— același element folosește atît pentru măsurare (protecție, automatizare) cît și ca condensator de cuplaj la linia de înaltă tensiune a unei instalații de telecomunicații prin înaltă frecvență (prin curenți purtători de ÎF);

— datorită repartiției foarte uniforme a tensiunii în lungul divizorului de tensiune capacitiv, aceste tipuri de transformatoare se comportă foarte bine la undele de șoc de supratensiune.

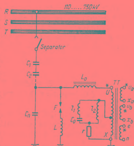


Fig. 5.23. Transformator de tensiune capacitiv.

Transformatorul de tensiune capacitiv se compune dintr-un divizor de tensiune capacitiv și un circuit inductiv de o tensiune mai joasă decît cea a rețelei.

Divizorul capacitiv este format dintr-o serie de condensatoare C_1, C_2 ... C_n (al căror număr este în funcție de tensiunea nominală a transformatorului) legate între faza activă și pămînt. Între o priză a acestui divizor și pămînt este conectat circuitul inductiv realizat de fapt dintr-un transformator inductiv de tensiune TT avînd înfășurarea primară marcată prin bornele U și X (U fiind borna polarizată) și trei înfășurări secundare: $u_a - x_a$; $u_b - x_b$ și $e - n$ (u_a, u_b și e fiind bornele polarizate). Se prevede în plus o bobină de șoc L_0 precum și un circuit antirezonant format din inductanțele l_1, l_2, capacitatea C_0 și rezistența r care împreună asigură protecția împotriva supracurenților; de asemenea descărcătorul F și inductanța L sînt elemente de protecție împotriva supratensiunilor.

Transformatoarele de tensiune capacitive fabricate în țara noastră sînt de tip monopolar, fiind realizate pentru tensiunile primare de $110/\sqrt{3}$; $220/\sqrt{3}$ și $400/\sqrt{3}$ kV, iar cele trei înfășurări secundare pentru tensiunile de $0{,}1/\sqrt{3}$; $0{,}1/\sqrt{3}$ și 0,1 kV.

Observație. Primele două înfășurări secundare ($u_a - x_a$ și $u_b - x_b$) sînt folosite pentru obținerea tensiunii polifazate de alimentare a aparatelor obișnuite de măsurare și protecție, iar cea de-a treia ($e - n$) pentru obținerea tensiunii homopolare.

Indicatorul transformatoarelor de tensiune capacitive fabricate în țara noastră este litera *C*. De exemplu: *TECU-400* reprezintă: transformator de tensiune (*T*) pentru exterior (*E*) de tip capacitiv (*C*) izolat în ulei (*U*) pentru tensiunea nominală de 400 kV (*400*).

Clasele de precizie ale transformatoarelor de tensiune capacitive sînt aceleași ca și la transformatoarele inductive (0,1; 0,2; 0,5; 1 și 3). Aceste erori sînt respectate însă cu condiția menținerii frecvenței $f = 50$ Hz între anumite limite (de exemplu: $\Delta f = \pm 1{,}5\%$ pentru măsurarea și $\Delta f = \pm 3\%$ pentru protecție) și nedepășirii sarcinilor secundare admise.

Pentru transformatoarele de tensiune capacitive construite pînă în prezent sarcinile secundare sînt cuprinse între 60 VA și 200 VA.

Transformatoarele de tensiune capacitive prezintă dezavantajul că sînt influențate de regimurile tranzitorii apărute în cazul unor perturbații care au loc pe partea primară (scurtcircuite, puneri la pămînt, supratensiuni etc.) sau pe partea secundară (scurtcircuite sau variații bruște de sarcină). Datorită acestor cauze în timpul regimurilor tranzitorii apar în circuitul inductiv de măsurare oscilații de ferorezonanță cu frecvențe de armonici superioare (150 Hz sau 250 Hz). Un criteriu de calitate al transformatoarelor de tensiune

capacitive îl constituie tocmai o comportare bună în regimul tranzitoriu, adică asigurarea în acest caz a unei precizii minime de măsurare. Astfel, la transformatoarele de tensiune capacitive fabricate în țara noastră oscilațiile care însoțesc fenomenele tranzitorii sînt astfel amortizate încît după 20 ms eroarea de măsurare scade sub 5%.

E. MĂSURI DE PROTECȚIA MUNCII LA EXPLOATAREA TRANSFORMATOARELOR DE MĂSURĂ

În afara măsurilor generale de protecție a muncii care se prevăd în instalațiile electroenergetice de înaltă și joasă tensiune la exploatarea transformatoarelor de măsură se vor avea în vedere și următoarele:

● Toate înfășurările secundare ale transformatoarelor de curent vor fi legate la pămînt însă într-un singur punct. De asemenea, blocurile de încercare * vor fi prevăzute cu o bornă de legare la masă care se introduce automat în circuit la scoaterea fișei blocului respectiv.

● În exploatare, la verificări și revizii periodice circuitele transformatoarelor de curent nu se vor deschide niciodată nici chiar pentru un timp scurt, funcționarea în gol a transformatorului de curent prezentînd pericol de electrocutare (2 000 ... 3 000 V).
În acest scop blocurile de încercare din circuitele de curent vor fi prevăzute cu șină (bandă) de scurtcircuitare.

● Se vor prevedea legări la pămînt în circuitele secundare ale transformatoarelor de tensiune. Se va avea în vedere ca prin arderea oricărei siguranțe din circuitele transformatorului de tensiune să nu se întrerupă legătura la pămînt. În acest scop pe conductorul neutru nu se vor monta siguranțe.

● La transformatoarele de curent se va lucra numai cu instalația scoasă de sub tensiune, iar la cele de tensiune, cu separatorul de racordare deschis vizibil. Desfacerea separatorului este obligatorie și atunci cînd barele sînt scoase de sub tensiune.

REZUMAT

● Transformatoarele de măsură sînt aparate electrice de înaltă tensiune care transformă (reduc) curentul și tensiunea într-un anumit raport de transformare.

● Transformatoarele de măsură se clasifică în: transformatoare de curent care reduc curentul de la valori de sute sau mii de amperi la valorile standardizate de 5 A sau 1 A și transformatoare de tensiune care reduc tensiunea de la valori de zeci sau sute de kilovolți la valoarea standard de 100 V.

● Oportunitatea folosirii transformatoarelor de măsură rezultă în primul rînd din faptul că se asigură separarea galvanică față de tensi-

* Blocurile de încercare sînt elemente electrice cu contacte, introduse pe circuitul transformator de curent — relee care permite intervenția în circuitul respectiv (de conectarea, scurtcircuitarea transformatoarelor de curent etc)

unile înalte și în al doilea rînd pentru că permite unificarea aparatelor de măsurare (5 A sau 1 A și 100 V).

● Transformatoarele de măsură sînt caracterizate prin parametrii lor nominali: curent, tensiune, raport de transformare, eroare de măsurare (clasă de precizie) sarcină secundară, domeniul de funcționare etc.

● Transformatoarele de măsură se asociază în unul, două sau trei elemente conectate în diverse moduri (stea, triunghi etc.) în funcție de necesitățile energetice.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Transformatoarele de curent funcționînd pe o impedanță dublă față de cea nominală:
   a) își măresc tensiunea la borne?
   b) își măresc curentul?
   c) își reduc puterea debitată?
2. Transformatoarele de tensiune funcționînd pe o impedanță dublă față de cea nominală:
   a) își măresc eroarea de măsurare?
   b) își reduc eroarea de măsurare?
   c) își măresc puterea debitată?
3. Sarcina secundară a unui transformator de curent se poate reduce:
   a) prin legarea în serie a înfășurărilor secundare?
   b) prin legarea în paralel a înfășurărilor secundare?
   c) prin legarea în triunghi a înfășurărilor secundare?
4. Coeficientul de saturație al unui transformator de curent este cu atît mai mare cu cît în condiții nominale:
   a) inducția este mai mică?
   b) inducția este mai mare?
   c) eroarea comupsă este mai mare?
5. Cu ajutorul a două transformatoare de tensiune monopolare se poate obține:
   a) o tensiune între faze?
   b) două tensiuni între faze?
   c) trei tensiuni între faze?
6. Cu ajutorul a două transformatoare de tensiune bipolare se poate obține:
   a) o tensiune între faze?
   b) două tensiuni între faze?
   c) trei tensiuni între faze?
7. Din punctul de vedere al protecției muncii este interzis ca fără nici o operație preliminară să deconectezi de la transformatoarele de măsurare:
   a) un releu de tensiune?
   b) un releu de curent?
   c) un releu de frecvență?

CAPITOLUL 6

ELEMENTE DE ADAPTARE UTILIZATE ÎN PFOTECŢIA PRIN RELEE

A. CONSIDERAŢII GENERALE

1. Introducere

După cum a rezultat din capitolele 3 şi 4 releele de protecţie se realizează pentru anumiţi parametri nominali (curenţi, tensiuni etc.) care pot fi modificaţi ca mărime (modul) într-un anumit domeniu limitat. Pe de altă parte, în capitolul 5 s-a arătat că transformatoarele de curent şi tensiune permit obţinerea din sistemul energetic al valorilor totale de curent şi de tensiune aferente celor trei faze (eventual numai de la una sau două dintre faze), mărimi care variază de asemenea între anumite limite. În scopul realizării diverselor scheme de protecţie prin relee sau automatizare, deci a unei adaptări între mărimile primitive obţinute de la transformatoarele de măsurare şi mărimile necesare a fi aplicate diverselor tipuri de relee, apare oportună folosirea unor elemente intermediare care, în cele ce urmează se vor defini prin denumirea generală şi convenţională de *elemente de adaptare.*

Procesele fizice care au loc în aceste elemente speciale pot fi considerate în linii mari următoarele:

— convertirea mărimilor electrice alternative în mărimi continue (redresoare) sau, eventual, invers (invertoare);

— transformarea mărimilor electrice alternative tot în mărimi electrice alternative (de aceeaşi frecvenţă) însă de valori (module) diferite;

— amplificarea sau divizarea mărimilor electrice continue sau alternative;

— modificarea fazei mărimilor electrice alternative;

— separarea (filtrarea) dintr-o mărime electrică a unei anumite părţi componente.

Corespunzător acestor procese fizice, în tehnica protecţiei prin relee şi a automatizărilor energetice sînt realizate o serie de elemente de adaptare avînd una sau mai multe dintre funcţiile enumerate mai sus.

Trebuie precizat că în structura unor asemenea tipuri de elemente se întîlnesc în principal o serie de componente electrice pasive: rezistoare, bobine şi condensatoare precum şi (eventual) componente electronice ca: diode, tranzistoare, tiristoare etc.

2. Clasificarea elementelor de adaptare

Datorită varietăţii mari a componentelor structurale precum şi a complexităţii funcţiilor îndeplinite, este destul de dificilă o clasificare exactă precum şi o definire precisă a domeniilor de aplicare a diverselor tipuri de elemente

de adaptare; totuşi ţinînd seamă de funcţiile îndeplinite în schemele de protecţie prin relee sau de automatizare, elementele de adaptare pot fi clasificate astfel:

— convertoare;
— transformatoare;
— amplificatoare;
— defazoare;
— filtre.

În cele ce urmează vor fi prezentate pe scurt fiecare dintre tipurile de elemente enunţate, exemplificîndu-se numai cu unele elemente specifice domeniului ce ne interesează.

B. CONVERTOARE

1. Clasificare

Noţiunea de *convertor* este foarte generală extinzîndu-se şi asupra mărimilor neelectrice. Ea defineşte o transformare (convertire) a unei mărimi într-o altă mărime pe baza unei legi (sau a unui raport de convertire) bine definite între parametrii celor două mărimi. De exemplu, în structura unor elemente de automatizare se întîlnesc asemenea convertoare (elemente de adaptare) care transformă:

— o mărime neelectrică în altă mărime neelectrică (de exemplu convertor forţă-deplasare sau convertor presiune-deplasare sau deplasare-presiune);
— o mărime neelectrică într-o mărime electrică (de exemplu adaptorul deplasare-curent tip *ELT 370* fabricat *IEA*);
— o mărime electrică într-o mărime neelectrică (de exemplu convertorul curent-presiune tip *ELA 104* fabricat *IEA*);
— o mărime analogică continuă într-o mărime numerică discontinuă (de exemplu convertorul analog-numeric);
— o mărime electrică de anumiţi parametri într-o altă mărime electrică de alţi parametri.

În ce priveşte protecţia prin relee şi automatizările energetice, întrucît mărimile care intervin sînt aproape în exclusivitate mărimi electrice, în cele ce urmează vor fi evidenţiate în exclusivitate această ultimă categorie de convertoare.

În acest sens o schemă generală de convertire a mărimilor electrice poate fi considerată cea din figura 6.1, în care s-a notat prin CC_1, CC_2 şi CC_3, respectiv prin CA_1, CA_2 şi CA_3 cîte trei reţele distincte de curent continuu (CC), respectiv alternativ (CA) avînd fiecare parametri electrici diferiţi.

Convertirea energiei electrice de la o formă la alta sau de la anumite valori ale parametrilor la altele este asigurată cu ajutorul următoarelor elemente fizice:

● **Redresorul** asigură transformarea energiei electrice de curent alternativ de frecvenţă $f = f_1$ (CA_1) în curent continuu $f = 0 - (CC_1)$.

● **Invertorul** permite obţinerea curentului alternativ la o frecvenţă $f = f_2(CA_2)$ folosind curentul continuu $f = 0 - (CC_2)$.

Dacă invertorul are în vedere aspectul energetic * (de putere) al convertirii el se numește *ondulor*, iar dacă este utilizat pentru obținerea unor semnale purtătoare de informație (de exemplu în electronică sau telemecanică) el se numește *oscilator* (de exemplu $f = 10$ kHz ... 500 MHz).

● **Stabilizatorul** de curent alternativ sau de curent continuu asigură menținerea la o valoare constantă a unuia dintre parametrii care interesează în mod special (tensiune, frecvență, curent etc.).

● **Divizorul** de curent continuu sau de curent alternativ reduce într-un anumit raport valoarea unui parametru (curent sau tensiune) aparținînd unor rețele de aceeași frecvență.

● **Transformatorul** poate fi considerat ca un convertor între două rețele de curent alternativ de aceeași frecvență ($f_1 = f_2$) și fără sursă de energie suplimentară.

● **Amplificatorul** poate fi de asemenea considerat ca un convertor între două rețele de curent continuu ($CC_1 \leftrightarrow CC_2$) sau de curent alternativ ($CA_1 \leftrightarrow CA_2$) de aceeași frecvență ($f_1 = f_2$) însă cu sursă de energie suplimentară (S_C sau S_A).

Din analiza figurii 6.1 și pe baza celor arătate se poate observa că pentru realizarea unui convertor de frecvență de la o valoare f_1 la alta f_2 este necesar să se folosească succesiv următoarele elemente:

$(f_1) \rightarrow$ *Redresor* $\rightarrow$ *amplificator cc.* (*divizor*) $\rightarrow$ *invertor* (f_2).

În cele ce urmează vor fi prezentate exemple de convertoare întîlnite în domeniul ce ne interesează.

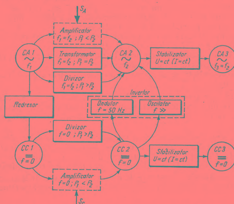


Fig. 6.1. Schema generală de convertire a mărimilor electrice.

* De exemplu pentru folosirea energiei electrice transportate la înaltă tensiune (800 kV) se folosesc ondulatoare care produc energia electrică la frecvența de 50 Hz.

2. Redresoare

Redresoarele sînt elemente cu proprietatea de conducție unidirecțională a curentului alternativ pe care-l transformă în curent continuu, de fapt în curent pulsatoriu.

Ca elemente redresoare în protecția prin relee se folosesc diodele semiconductoare, cu germaniu sau siliciu, apoi cele cu cuproxid sau cu seleniu etc.

● **Redresoarele monoalternanță** (fig. 62, *a*) asigură un curent redresat conținînd numai pulsurile (alternanțele) pozitive, cele negative fiind suprimate (fig. 6.2, *b*). Această schemă se întîlnește destul de rar.

● **Redresoarele bialternanță** asigură redresarea ambelor alternanțe (fig. 6.3, *b*) și se realizează în trei variante constructive:

— schema de redresare cu două diode (D_1 și D_2) și transformator (T) cu priză mediană (fig. 6.3, *a*);

— schema de redresare în punte Graez cu patru diode (fig. 6.3, *c*);

— schema de redresare în punte Graez cu două diode (D_1 și D_2) și două rezistoare (R_1 și R_2) (fig. 6.3, *d*).

Schemele de redresoare în punte sînt folosite frecvent la unele tipuri de relee diferențiale (de exemplu *RDS-4*), la releele direcționale statice (de exemplu *RD$_c$-3*), precum și la unele protecții de distanță.

Redresoarele trifazate (mono- și bialternanță) se utilizează mai puțin în protecția prin relee.

3. Stabilizatoare

Dintre tipurile principale de stabilizatoare: cu rezistențe neliniare, feromagnetice, ferorezonante și electronice în protecția prin relee, cel mai frecvent întîlnite sînt cele din prima și ultima categorie.

● **Baretorul** este un element stabilizator cu rezistență neliniară construit dintr-un tub special cu un filament de fier în atmosferă de hidrogen (lampă F_e — H). Baretorul B (fig. 6.4, *a*) se montează în serie cu rezistența de sarcină R_s și asigură menținerea aproape constantă a curentului I (fig. 6.4, *b*): $\Delta I = I_b - I_a \approx 0$ — pentru un domeniu larg de variație a căderii de tensiune U_B pe tub ($U_{Ba} - U_{Bb}$).

Observație. Din figura 6.4, *b* se constată caracterul neliniar al rezistenței tubului B, punctul de funcționare *f* variind între punctele limită *a* și *b* la valoare

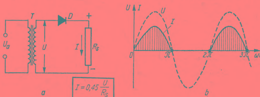


Fig. 6.2. Redresor monoalternanță:
a — schema; *b* — diagrama curentului redresat.

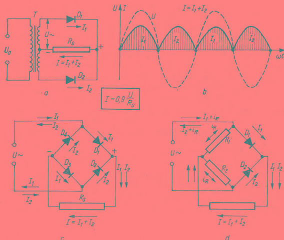


Fig. 6.3. Redresor bialternanță:

a — schema cu transformator cu priză mediană; *b* — diagrama curentului redresat; *c* — schema în punte Graez cu patru diode; *d* — schema în punte Graez cu două diode.

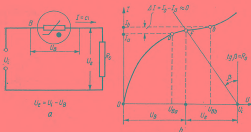


Fig. 6.4. Baretor:

a — schema principială; *b* — caracteristica de funcționare.

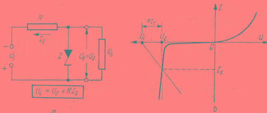


Fig. 6.5. Stabilizator cu o diodă Zener:
a — schema electrică; *b* — caracteristica de funcționare.

practic constantă a curentului *I*. Denumirea de *baretor* rezultă din faptul că în domeniul *a-b* deși U_B crește, curentul este „barat" (oprit) să crească.

Baretorul este folosit într-un anumit tip de protecție contra punerilor la pămînt statorice la generatoare) (protecția Bütow).

● **Stabilizatoarele electronice** s-au realizat cu tuburi electronice; în prezent ele se construiesc aproape exclusiv cu diode Zener și tranzistoare.

În figura 6.5, *a* se prezintă cea mai simplă schemă de stabilizare cu diodă Zener. Dioda Zener *Z* are proprietatea de străpungere nedistructivă la o valoare U_z a tensiunii inverse (fig. 6.5, *b*). În consecință tensiunea de ieșire U_e se menține, practic, la valoarea constantă U_z numită „tensiune Zener", creșterea curentului $I_s(\Delta I_s)$ datorat creșterii tensiunii de alimentare U_i, producînd o creștere suplimentară ΔU_R a căderii de tensiune pe rezistența de balast *R*.

În figura 6.6 sînt prezentate două scheme de stabilizatoare cu diode Zener și tranzistoare.

Schema din figura 6.6, *a* cuprinde tranzistorul *T* conectat în derivație pe rezistența de sarcină R_S. Pornind de la o anumită stare de echilibru stabilizarea are loc în felul următor:

— Cînd U_i crește, curentul I_Z va crește și deoarece potențialul bazei tranzistorului *T* (punctul *b*) rămîne neschimbat în raport cu borna „minus" (U_Z = const) înseamnă că U_{be} va crește, deci baza *b* devine mai negativă în raport cu borna „plus". Aceasta va avea ca efect scăderea rezistenței de trecere emitor-colector, deci creșterea curentului de colector I_c. Totul este proiectat astfel încît creșterea curentului *I* ($I = I_c + I_Z$) să producă o sporire a căderii de tensiune U_R (pe rezistența *R*) care să compenseze creșterea tensiunii de intrare U_i. În acest mod tensiunea de ieșire U_e de la bornele rezistenței de sarcină R_S este menținută constantă (stabilizată).

— La scăderea tensiunii U_i procesul are loc în sens invers (U_i scade $\rightarrow I_Z$ scade $\rightarrow U_{be}$ scade $\rightarrow I_c$ scade $\rightarrow U_R$ scade $\rightarrow U_e = const$).

Schema din figura 6.6, *b* cuprinde tranzistorul *T* conectat în serie cu rezistența de sarcină R_s. Similar cazului precedent, pornind de la o stare normală de funcționare și presupunînd o creștere a tensiunii U_i se observă că curentul I_Z va crește, iar potențialul bazei *b* al tranzistorului devine mai pozitiv *, ceea ce are ca efect scăderea curentului din bază (I_b), respectiv, creșterea

* Este exact invers decît în schema 6.6, *a* dioda Zener *Z* și rezistența R_0 fiind inversate ca poziție în schemă.

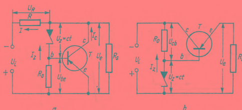


Fig. 6.6. Stabilizator cu diodă Zener și tranzistor:
a — tip derivație (de tensiune); *b* — tip serie (de curent).

rezistenței interne (emitor-colector) a tranzistorului *T*. Rezultă, așadar, o creștere a căderii de tensiune pe tranzistorul *T* care compensează creșterea tensiunii de intrare U_i astfel că U_e este stabilizată.

La scăderea tensiunii U_i procesul descris este invers (U_i scade $\rightarrow I_Z$ scade $\rightarrow U_{be}$ scade $\rightarrow R_{ec}$ scade $\rightarrow U_e = const$).

4. Convertoare curent-tensiune

În realizarea unor protecții de distanță, a unor relee direcționale sau chiar diferențiale apare necesară compararea valorilor măsurate ale unor curenți și tensiuni. Este evident că o asemenea operație implică convertirea uneia dintre mărimi la dimensia celeilalte; de obicei convertirea curentului i într-o tensiune U_i proporțională cu curentul și care poate fi comparată cu tensiunea U.

Cel mai simplu convertor curent-tensiune este cel rezistiv (fig. 6.7, *a*) obținut prin parcurgerea unei rezistențe etalon R_s de către cuerntul $I(U_i = R_s I)$. De exemplu: un curent $I = 5$ A parcurgînd o rezistență $R_s = 1\ \Omega$ produce o tensiune $U_i = 5$ V.

Observație. Puterea debitată de transformatorul de curent este:

$$P_s = R_s i^2 = 1 \times 5^2 = 25 \text{ VA},$$

adică o valoare apropiată de cea reală.

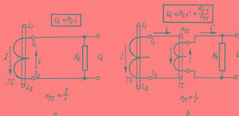


Fig. 6.7. Convertor curent tensiune:
a — tip rezistiv; *b* — cu transformator de adaptare.

Dacă se dorește obținerea unei tensiuni mai mari pentru curentul nominal, atunci convertorul este prevăzut cu un transformator de curent intermediar de adaptare *TI* (fig. 6.7, *b*) în secundarul căruia se montează rezistența de sarcină R_s.

De exemplu, dacă se consideră raportul de transformare $n_{TI} = 5/0,5$ A și $R_s = 100\ \Omega$ se obține:

$$U_i = 0,5 \times 100 = 50 \text{ V},$$

$$P_s = 100 \times 0,5^2 = 25 \text{ VA}.$$

Rezultă că față de exemplul precedent, deși s-a obținut o tensiune de zece ori mai mare, puterea absorbită a rămas neschimbată.

C. TRANSFORMATOARE

Dintre transformatoarele de adaptare utilizate în protecția prin relee vor fi prezentate cele mai importante și anume:

— transformatorul de egalizare;

— transformatorul cu saturație rapidă;

— transformatorul sumator (de amestec).

1. Transformatoare de egalizare

Este un transformator de tipul curent-curent realizat frecvent sub formă de autotransformator trifazat (fig. 6.8), fiind folosit de obicei în circuitele protecției diferențiale.

Curenții nominali sînt cuprinși de obicei în domeniul 3—8 A, raportul de transformare fiind apropiat de 1 (de exemplu $n_{TE} = 5/4$ A). Tensiunea magnetomotoare este de obicei de 100 As, ceea ce înseamnă că, de exemplu, pentru transformatorul de 5/4 raportul numărului de spire este de 20/25 (fig. 6.8).

Realizat sub formă de transformator acesta poate fi folosit și pentru egalizare și pentru rotirea fazelor (fig. 6.9) prin legarea în triunghi a înfășurărilor secundare.

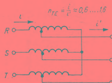


Fig. 6.8. Transformator de egalizare.

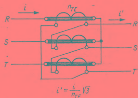


Fig. 6.9. Transformator de egalizare și de modificare (rotire) a fazelor.

Observație. Folosind, de exemplu, trei transformatoare monofazate de 5/4 A legate în triunghi pe partea secundară, se va obține în final un transformator trifazat de egalizare cu raportul de $5/4\sqrt{3}$ A și de rotire cu 30°.

2. Transformatorul cu saturație rapidă (TSR) (fig. 6.10, a)

Este numit astfel deoarece în condiții de funcționare normală miezul său magnetic se află la limita de saturație (fig. 6.10, *b*). Rolul său este de a elimina componenta aperiodică de curent la producerea unui scurtcircuit.

Din figura 6.10, *b* se constată următoarele:

— În lipsa componentei aperiodice I_a la o perioadă completă a curentului de intrare $I_i = I_{i_1}$, deoarece ambele alternanțe sînt simetrice în raport cu axa timpului *t*, variația inducției magnetice ΔB în fierul transformatorului va avea o valoare maximă ΔB_1. Întrucît curentul I_e în secundarul transformatorului este proporțional cu tensiunea electromotoare indusă $I_e = \frac{E_e}{R_e}$, iar aceasta este proporțională cu variația fluxului magnetic în fier $E_e = -n_e \frac{d\Phi}{dt}$, n_e fiind numărul de spire al înfășurării secundare, și în sfîrșit fluxul magnetic este proporțional cu variația inducției ($\Delta\Phi = \Delta B \cdot S$, *S* fiind secțiunea miezului magnetic) rezultă în definitiv că curentul I_e în secundar va avea o valoare maximă I_{e_1} proporțională cu ΔB_1 ($I_e = I_{e_1}$) și va face să funcționeze releul *R*.

— În prezența componentei aperiodice I_a la o perioadă completă a curentului de intrare $I_i = I_{i_2}$, deși acesta are aceeași amplitudine cu curentul precedent. ($|I_{i_2}| = |I_{i_1}|$) însă fiind deplasat cu componenta aperiodică față de axa timpului, produce o variație a inducției în miezul transformatorului $\Delta B = \Delta B_2$, care este mult mai mică decît în lipsa componentei aperiodice. Ca urmare curentul I_e va avea o valoare minimă I_{e_2} proporțională cu ΔB_2 și releul *R* nu va funcționa.

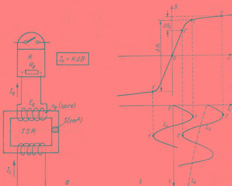


Fig. 6.10. Transformator cu saturație rapidă:
a — schema electrică; *b* — caracteristica de funcționare.

3. Transformatorul sumator (de amestec)

Acest transformator permite obținerea unui curent monofazat printr-o combinare adecvată a mai multor curenți, avînd mai multe înfășurări primare racordate la transformatoarele de curent și o înfășurare secundară pentru alimentarea unui releu (fig. 6.11).

În figura 6.11, *a* este arătată schema unui transformator de amestec a cărui înfășurare primară conține trei secțiuni cu număr egal de spire $n_1 = n_2 = n_3 = n_0$. Considerînd, pentru simplificare, că și înfășurarea secundară conține același număr de spire n_0 și observînd circulația celor trei curenți i_R, i_S și i_T prin bobinele primare se poate conchide că curentul i_m prin releul I_m va fi:

$$\underline{i}_m = 3\underline{i}_R + 2\ _S + \underline{i}_T. \qquad (6.1)$$

Pornind de la această relație, prin construcția diagramei fazoriale (fig. 6.12) se poate determina ușor valoarea curentului i_m în mărime și direcție. De exemplu pentru un scurtcircuit trifazat (fig. 6.12, *a*) ca și în regim normal de funcționare $i_m = \sqrt{3}i_R$, iar pentru un scurtcircuit bifazat (fig. 6.12, *b*) $R-T$, $|\underline{i}_m| = |3\underline{i}_R + \underline{i}_T| = 2i_R$.

O soluție echivalentă este indicată în figura 6.11, *b*, în care se folosesc trei înfășurări primare cu număr diferit de spire: $n_1 = 3n_0$; $n_2 = 2n_0$ și $n_3 = n_0$, înfășurarea secundară avînd același număr de spire n_0. Curentul secundar i_m este și în acest caz dat de relația (6.1).

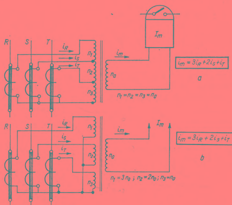


Fig. 6.11. Transformator de amestec:

a — cu înfășurarea primară cu trei secțiuni; *b* — cu trei înfășurări primare.

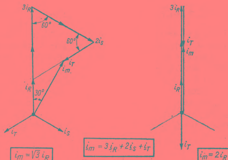


Fig. 6.12. Diagrama fazorială a curenților la transformatorul de amestec:
a — pentru scurtcircuit trifazat; *b* — pentru scurtcircuit bifazat.

D. AMPLIFICATOARE

1. Clasificare

Amplificatoarele sînt elemente la care mărimea de intrare X_i (fig. 6.13, *a*) de o putere relativ mică poate comanda în mod continuu o mărime de ieșire X_e proporțională cu cea de intrare, însă de o putere mult mai mare. Este evident că obținerea unui factor de amplificare supraunitar este posibilă numai prin folosirea unei surse auxiliare de energie *S*.

În figura 6.13, *b* este prezentată caracteristica statică a amplificatorului $X_e = f(X_i)$. Amplificatoarele se clasifică în două categorii mari:

- **Amplificatoare de mărimi electrice** (electronice, magnetice, electromecanice, rotative etc.).
- **Amplificatoare de mărimi neelectrice** (mecanice, pneumatice și hidraulice).

În protecția prin relee și automatizările energetice sînt utilizate amplificatoarele electronice cu semiconductoare (care au de obicei structuri normalizate) și amplificatoarele magnetice.

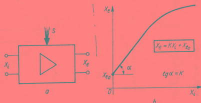


Fig. 6.13. Amplificator (în general):
a — schema bloc; *b* — caracteristica statică.

Funcționarea amplificatoarelor magnetice se bazează pe variația inductanței L a unei bobine cu miez de fier (magnetic) datorită variației permeabilității magnetice a miezului respectiv, sub influența unui cîmp magnetic continuu.

Pe un miez magnetic inelar (fig. 6.14, *a*) se află o bobină B_C numită bobina de comandă, căreia i se aplică curentul continuu de comandă I_C și bobina de lucru B_l legată în serie cu rezistența de sarcină R_s și alimentată cu tensiunea alternativă U. Aceasta constituie schema principială a unui amplificator magnetic.

Mărimea de intrare a amplificatorului este curentul de comandă I_c (curent continuu), iar cea de ieșire este curentul de lucru I_s (curent alternativ).

Prin varierea curentului I_c se modifică și cîmpul continuu H_c produs de bobina B_c:

$$H_c = \frac{n_c I_c}{l}, \tag{6.2}$$

în care:

n_c este numărul de spire al bobinei de comandă B_c;
l — lungimea circuitului magnetic al miezului.

Ținînd seamă de curba de magnetizare $B = f(H)$ (fig. 6.15) se constată că permeabilitatea magnetică μ a fierului se modifică în funcție de cîmpul continuu H_c. Astfel, de exemplu, pentru $H_c = H_{c1}$, permeabilitatea magnetică este:

$$\mu_1 = \frac{dB_1}{dH_1} = \operatorname{tg} \alpha_1, \tag{6.3}$$

notînd prin aceasta derivata în punctul *1* (fig. 6.15), iar pentru $H_c = H_{c2}$ similar:

$$\mu_2 = \frac{dB_2}{dH_2} = \operatorname{tg} \alpha_2. \tag{6.4}$$

Se observă că permeabilitatea magnetică μ scade cu creșterea cîmpului H_c:

$$\mu_1 > \mu_2 \Rightarrow H_{c1} < H_{c2}. \tag{6.5}$$

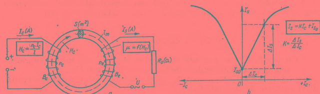


Fig. 6.14. Amplificator magnetic:
a — schema electrică; *b* — caracteristica statică.

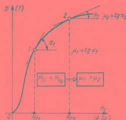


Fig. 6.15. Curba de magnetizare $B = f(H)$.

Variația permeabilității magnetice μ produce variația proporțională a inductanței L a bobinei de lucru B_l:

$$L = \frac{n_e^2}{l} S \cdot \mu, \tag{6.6}$$

în care:

n_e este numărul de spire al bobinei de lucru, B_l;
S — secțiunea miezului magnetic.

Ca urmare se va produce și variația impedanței Z a circuitului de ieșire:

$$Z = \sqrt{R_s^2 + \omega^2 L^2} = \sqrt{R_s^2 + A^2\mu^2}, \tag{6.7}$$

în care s-a notat prin A constanta (v. rel. 6.6):

$$A = \omega \frac{n_e^2}{l} S.$$

Curentul I_s din circuitul de ieșire se va modifica și el în consecință:

$$I_s = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + A^2\mu^2}}. \tag{6.8}$$

Ținînd seamă de relațiile (6.2) ... (6.8) se poate constata că curentul de lucru I_s (de ieșire) variază proporțional cu curentul de comandă I_c (de intrare) relația de dependență fiind definită astfel:

$$I_s = K \cdot I_c + I_{s0}, \tag{6.9}$$

în care:

K este factorul de amplificare (pantă);
I_{s0} — valoarea de gol.

Expresia grafică a relației (6.9) reprezintă caracteristica statică a amplificatorului magnetic (fig. 6.14, *b*).

E. CIRCUITE DEFAZOARE

În circuitele protecțiilor de distanță sau direcționale apare uneori necesitatea defazării cu un anumit unghi a unor tensiuni sau curenți.

1. Circuit defazor de tensiune

În figura 6.16, *a* se prezintă un element defazor de tensiune cuprinzînd două circuite paralele alimentate de tensiunea de intrare U_i.

— Primul circuit este format din două rezistoare avînd rezistențe identice R_0 și parcurse de curentul I_0:

$$I_0 = \frac{U_i}{2R_0}. \tag{6.10}$$

Observație. Curentul I_0 este constant ca modul și invariabil ca fază față de U_i (în fază cu U_i).

— Cel de al doilea circuit cuprinde un condensator fix de capacitate C_1 și un rezistor de rezistență variabilă R_1. Curentul I_1 variază în funcție de R_1:

— ca modul:

$$I_1 = \frac{U_i}{\sqrt{R_1^2 + \frac{1}{\omega^2 C_1^2}}}; \tag{6.11}$$

— ca fază (fig. 6.16, *b*):

$$\alpha_1 = \operatorname{arc\,tg} \frac{1}{\omega R_1 C_1}. \tag{6.12}$$

Deoarece căderile de tensiune pe rezistența R_1 (U_{R_1}) și pe capacitatea $C_1(U_{C_1})$ sînt în permanență în cuadratură (fig. 6.16, *b*), rezultă că pentru orice valoare a lui R_1 punctul *c* se va deplasa pe un semicerc între punctele *a* și *b*.

De asemenea, deoarece cele două rezistențe R_0 sînt egale, căderile de tensiune pe acestea vor fi egale (U_{R_0}), adică:

$$U_i = 2U_{R_0}, \tag{6.13}$$

deci punctul *d* se află în centrul semicercului (fig. 6.16, *b*).

— Tensiunea de ieșire U_e obținută între punctele *c* și *d* (v. fig. 6.16, *a*) este:

— constantă ca modul:

$$U_e = U_{cd} = U_0 = \frac{U_i}{2}; \tag{6.14}$$

— variabilă ca fază:

$$\varphi_e = 2\alpha. \tag{6.15}$$

Așadar, prin varierea rezistenței R_1 se obține la ieșirea circuitului defazor o tensiune U_e pe jumătate din valoarea tensiunii de intrare U_i (raport de transformare 2) și cu o fază variind între $-180°$ (cînd $R_1 = 0$) și $0°$ ($C = 0$).

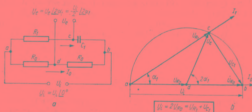


Fig. 6.16. Circuit defazor de tensiune cu raport de transformare 2:
a — schema electrică; *b* — diagrama fazorială.

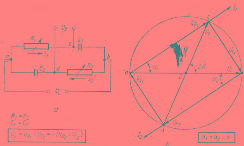


Fig. 6.17. Circuit defazor de tensiune cu raport de transformare 1:
a — schema electrică; b — diagrama fazorială.

În figura 6.17, a se prezintă schema unui circuit defazor format din două rezistoare variabile identice ($R_1 = R_2$) reglabile simultan și simetric și două condensatoare identice ($C_1 = C_2$).

Cei doi curenți I_1 și I_2 care iau naștere cînd se aplică tensiunea de intrare U_i sînt egali cu modul și în opoziție de fază (fig. 6.17, b) fiind definiți de relațiile (6.11) și (6.12).

Observație. Circuitul prezentat este de fapt identic cu cel precedent (fig. 6.16) însă este dublu, rezistențele R_0 nemaifiind necesare. Funcționarea este similară cu cea din cazul precedent cu observația că tensiunea de ieșire U_e este egală cu cea de intrare U_i (raport de transformare 1), punctele c și d deplasîndu-se simultan și simetric pe același cerc (fig. 6.17, b).

2. Circuit defazor de curent

Defazarea curentului se poate obține ca și în cazul tensiunii, curentul respectiv fiind convertit în prealabil într-o tensiune. Un circuit defazor de curent întîlnit în protecția prin relee este cel care a fost prezentat în figura 6.9 (legarea în triunghi a transformatoarelor de curent). Amplitudinea curenților obținuți este cu $\sqrt{3}$ ori mai mare decît cea a curenților aplicați, iar defazajul obținut este fix, putînd fi modificat numai prin valori discrete: $\varphi_I = 30$, 90, 150, 210, 270 și 330°.

F. FILTRE

În accepțiunea generală a cuvîntului, prin filtru se înțelege de obicei un element de circuit care permite selectarea (filtrarea) dintr-o anumită mărime a unui semnal de parametrii doriți (filtru de trecere), de exemplu filtru de curent homopolar sau de tensiune inversă. Există însă și cazuri în care filtrul

trebuie să oprească un semnal de parametrii doriți (filtru de blocare) permițînd trecerea reziduului.

Dintre filtrele folosite în domeniul care ne interesează se vor aminti filtrele: *de componente simetrice* și *de armonici*.

1. Filtre de componente simetrice

Anumite stări de defect sau regimuri anormale din rețelele și mașinile electrice nu pot fi detectate cu suficientă sensibilitate pe baza controlului tensiunii sau curentului.

În aceste cazuri este util să se folosească filtre de componente simetrice, schema bloc a unui asemenea filtru fiind prezentată în figura 6.18.

În cazul general, tensiunea U_F de la ieșirea filtrului este dată de relația:

$$\underline{U}_F = \underline{K}_1\underline{U}_1 + \underline{K}_2\underline{U}_2 + \underline{K}_0\underline{U}_0, \qquad (6.16)$$

în care:

$\underline{U}_1$, $\underline{U}_2$ și $\underline{U}_0$ sînt componentele simetrice directă, inversă și homopolară referitoare la una din fazele sistemului trifazat;

$\underline{K}_1$, $\underline{K}_2$ și $\underline{K}_3$ — coeficienți complecși de proporționalitate.

Relația (6.16) definește cazul general al unui filtru combinat la care poate lipsi în unele cazuri și unul din cei trei termeni ($\underline{K}_1 = 0$ sau $\underline{K}_2 = 0$ sau $\underline{K}_0 = 0$).

Filtrul a cărui relație de definiție conține un singur termen se numește filtru simplu. Astfel avem filtre pentru componente de secvență:

— directă: $U_F = \underline{K}_1\underline{U}_1$;

— inversă: $U_F = \underline{K}_2\underline{U}_2$;

— homopolară: $U_F = \underline{K}_0\underline{I}_0$.

După cum s-a arătat anterior filtrele de curent sau tensiune homopolară se obțin foarte ușor prin legarea în paralel a înfășurărilor secundare ale transformatoarelor de curent (v. fig. 5.11, *c*), respectiv prin legarea în serie a înfășurărilor secundare ale transformatoarelor de tensiune (v. fig. 5.16, *c*).

● **Filtru de tensiune de secvență inversă.** Schema de principiu a unui filtru de tensiune de secvență inversă este prezentată în figura 6.19, *a*. Acest filtru este format din două brațe capacitate-rezistență $C_A - R_A$, respectiv $C_B - R_B$ și alimentat cu tensiunea între faze, ceea ce asigură eliminarea componentei homopolare de tensiune.

Constructiv se alege:

$$\frac{X_A}{R_A} = \frac{1}{\omega C_A R_A} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad \text{și} \quad \frac{X_B}{R_B} = \frac{1}{\omega C_B R_B} = \sqrt{3} \qquad (6.17)$$

în care ω este pulsația curentului alternativ ($\omega = 2\pi f$).

În acest caz considerînd un sistem de tensiuni de secvență directă U_{R_1}, U_{S_1} și U_{T_1} diagrama fazorială a căderilor de tensiune va rezulta ca în figura 6.19, *b*, deoarece:

— curentul I_A va fi defazat cu unghiul $\varphi_A = 30°$ înaintea tensiunii U_{SR_1}, lucru care rezultă din relația:

$$\operatorname{tg} \varphi_A = \frac{U_{CA}}{U_{RA}} = \frac{X_A I_A}{R_A I_A} = \frac{X_A}{R_A} = \frac{1}{\sqrt{3}} \rightarrow \varphi_A = 30°; \quad (6.18)$$

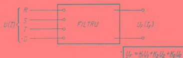


Fig. 6.18. Schema bloc a unui filtru.

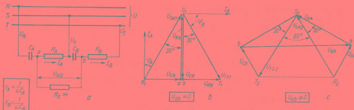


Fig. 6.19. Filtru de tensiune de secvență inversă:
a — schema de principiu; *b* — diagrama fazorială în cazul unui sistem trifazat de tensiune de secvență directă; *c* — diagrama fazorială în cazul unui sistem trifazat de tensiune de secvență inversă.

— cele două căderi de tensiune $U_{CA} = X_A I_A$ și $U_{RA} = R_A I_A$ fiind în cuadratură potențialul punctului *a* se va afla la jumătatea fazorului tensiunii U_{RT_1};

— curentul I_B va fi defazat cu unghiul $\varphi_B = 60°$ înaintea tensiunii U_{TS_1}, ceea ce rezultă din relația:

$$\operatorname{tg}\varphi_B = \frac{U_{CB}}{U_{RB}} = \frac{X_B I_B}{R_B I_B} = \frac{X_B}{R_B} = \sqrt{3} \rightarrow \varphi_B = 60°; \tag{6.19}$$

— cele două căderi de tensiune $U_{CB} = X_B I_B$ și $U_{RB} = R_B I_B$ fiind în cuadratură potențialul punctului *b*, va coincide cu cel al punctului *a*.

Ca urmare, tensiunea U_{ab} va fi nulă ($U_{ab} = 0$) și deci componenta directă aferentă unui sistem trifazat de tensiune este eliminată.

Considerînd un sistem de tensiuni de secvență inversă U_{R_2}, U_{S_2} și U_{T_2} se obține diagrama fazorială a căderilor de tensiune din figura 6.19, *c*.

Observație. Diagrama din figura 6.19, *c* se obține de fapt din cea din figura 6.19, *b* prin inversarea fazelor *R* cu *T*.

Tensiunea de ieșire U_{ab} care se aplică rezistenței de sarcină R_s (releului) reprezintă chiar valoarea tensiunii de secvență inversă:

$$U_{ab} = 3U_2, \tag{6.20}$$

deoarece, așa cum s-a văzut, componentele homopolare și directe de tensiune nu au trecut prin filtru.

● **Filtru de curent de secvență inversă.** Ca și filtrele de tensiune, filtrele de curent de secvență inversă se execută pe baza aceluiași principiu adică folosind circuite *RC* (fig. 6.20, *a*). În mod analog cu cazul anterior, se construiește diagrama fazorială a curenților pentru un sistem trifazat de secvență directă I_{R_1}, I_{S_1} și I_{T_1} (fig. 6.20, *b*), din care punînd condiția ca punctele *s* și *x* să aibă același potențial ($I_{sx} = 0$) rezultă valorile necesare ale rapoartelor dintre reactanțele capacitive și rezistențele din brațele filtrului:

$$\frac{X_B}{R_B} = \sqrt{3}, \quad \frac{X_T}{R_T} = \frac{1}{\sqrt{3}}. \tag{6.21}$$

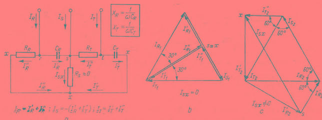


Fig. 6.20. Filtru de curent de secvență inversă:

a — schema de principiu; *b* — diagrama fazorială în cazul unui sistem trifazat de curenți de secvență directă; *c* — diagrama fazorială în cazul unui sistem trifazat de curenți de secvență inversă.

Observație. Aceste relații au rezultat din condițiile:

$$U_{rs} = U_{sx} \text{ sau } I'_R \cdot X_R = I''_R R_R \rightarrow \frac{I''_R}{I'_R} = \frac{X_R}{R_R} = \sqrt{3}, \qquad (6.22)$$

respectiv:

$$U_{ts} = U_{tx} \text{ sau } I'_T X_T = I''_T R_T \rightarrow \frac{I''_T}{I'_T} = \frac{X_T}{R_T} = \frac{1}{\sqrt{3}}. \qquad (6.22)$$

În cazul unui sistem trifazat de curenți de secvență inversă I_{R_2}, I_{S_2} și I_{T_2}, ceea ce corespunde practic inversării între ei a doi curenți, diagrama fazorială se va prezenta ca în figura 6.20, *c*.

Curentul de secvență inversă I_2 corespunzător diferenței de potențial între punctele *s* și *x* are de data aceasta o valoare apreciabilă. S-a presupus că impedanța de sarcină R_s a releului de curent are o impedanță neglijabilă.

Pentru reglarea precisă, în sarcină a filtrelor rezistoarele acestora sînt prevăzute cu cursor (ajustare).

2. Filtre de armonici

Cel mai simplu filtru de armonici este cel folosit la protecția generatoarelor împotriva scurtcircuitelor între spirele statorice și este prezentat principial în figura 6.21. El este destinat să oprească armonicele superioare, fapt pentru care mai este numit și filtru trece jos. Pentru armonicele superioare (100, 150 Hz) reactanța capacitivă *C* scade, fapt care favorizează închiderea (suntarea) curenților corespunzători. În acest mod se permite trecerea mai departe a curentului fundamental (50 Hz).

În figura 6.22 este prezentată schema principală a filtrului de armonică 2 folosit în schema releului diferențial *RDS-4* pentru producerea efectului de frînare (v. cap. 10).

Se observă că în afara transformatorului de adaptare T_a filtrul mai cuprinde în principal trei circuite rezonante*. Circuitele rezonante L_1, C_1 și L_3, C_3

* Se reamintește că la rezonanță, $f = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, impedanța unui circuit *LC* se reduce considerabil, limitîndu-se numai la valoarea rezistenței, practic neglijabilă?

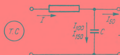


Fig. 6.21. Filtru de blocare a armonicilor superioare (trece jos).

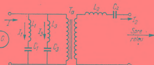


Fig. 6.22. Filtru de trecere a armonicei 2 (trece banda).

sînt acordate pe armonica 1 (50 Hz) (fundamentala) și armonica 3 (150 Hz) și fiind legate în derivație produce oprirea (scurtcircuitarea) acestor frecvențe. Dimpotrivă, circuitul rezonant L_2, C_2 fiind acordat pe armonica 2 (100 Hz) și legat în serie pe circuit favorizează trecerea frecvenței respective.

Circuitul astfel realizat constituie de fapt un *filtru trece bandă* ($f = 100$ Hz).

REZUMAT

- Elementele de adaptare sînt necesare pentru convertirea, transformarea, amplificarea, divizarea, modificarea fazei sau filtrarea din mărimile electrice alternative preluate de la transformatoarele de măsură a unor mărimi (semnale) necesare releelor.

- Corespunzător funcțiilor enunțate elementele de adaptare se pot clasifica în: convertoare, redresoare, stabilizatoare, transformatoare, amplificatoare, defazoare, filtre etc.

- Dintre transformatoare, cele mai des utilizate sînt cele de egalizare, cu saturație rapidă și sumatoare (de amestec).

- Circuitele defazoare pot fi de tensiune și de curent avînd posibilitatea de modificare a fazei în mod continuu sau discret.

- Filtrele folosite în mod curent sînt cele de componente simetrice (tensiune sau curent) precum și cele de armonici.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Transformatorul cu saturație rapidă permite eliminarea din curentul de scurtcircuit a componentei:
   a) periodice?
   b) aperiodice?
   c) permanente?
2. Circuitele defazoare de tensiune pot modifica faza mărimilor de intrare:
   a) numai continuu?
   b) numai discret?
   c) continuu sau discret ?

3. Transformatorul de amestec permite obținerea unei mărimi de ieșire:
a) numai la defecte bifazate?
b) numai la defecte trifazate?
c) la defecte bi și trifazate?

4. Filtrul de tensiune de secvență inversă asigură:
a) eliminarea componentei directe?
b) eliminarea componentei inverse?
c) eliminarea componentei homopolare?

5. Filtrul de armonică 2 este un element de tipul:
a) trece jos?
b) trece sus?
c) trece bandă?

CAPITOLUL 7

SCHEME ȘI SEMNE CONVENȚIONALE UTILIZATE ÎN PROTECȚIA PRIN RELEE

A. SCHEME UTILIZATE ÎN PROTECȚIA PRIN RELEE

1. Scheme de principiu

În schemele de principiu se prezintă aparatele și dispozitivele care intră în componența unei protecții împreună cu legăturile dintre ele.

Schemele de principiu pot fi reprezentate în două moduri: ca scheme restrînse (sau concentrate) și ca scheme desfășurate.

● **Scheme de principiu restrînse (concentrate).** În schemele de principiu restrînse aparatele se reprezintă cu toate elementele lor în același loc din schemă. De exemplu, releele se reprezintă cu bobinele și contactele respective, întrerupătoarele de înaltă tensiune se reprezintă cu contactele principale și cu toate contactele auxiliare (de blocare) etc.

Pentru ilustrare, în figura 7.1 este reprezentată simplificat schema de principiu restrînsă a unei protecții maximale de curent pentru o linie *L*. Bobinele releelor maximale de curent *1RC* și *2RC* (se consideră simbolic că bobinele unui releu se găsesc în dreptunghiul semnului convențional pentru releu) sînt alimentate de înfășurările secundare ale transformatoarelor de curent $1TC_R$ și $1TC_T$, instalate pe fazele *R* și *T* ale liniei protejate, iar contactele releelor de curent (figurate în semicercul din partea superioară a semnului convențional pentru relee) sînt legate în paralel între ele și în serie cu bobina releului de timp *RT*.

Contactul releului de timp este legat în serie cu bobina releului intermediar *RI*, iar contactul acestuia se găsește în același circuit cu contactele auxiliare ale întrerupătorului *I* și cu bobina de declanșare *BD* a întrerupătorului.

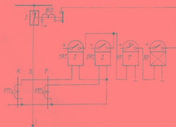


Fig. 7.1. Exemplu de schemă de principiu restrînsă.

În schema din figura 7.1 sînt folosite semnele convenționale din tabelele 7.1 și 7.2, prezentate în cadrul acestui capitol. Schemele de principiu restrînse pot fi reprezentate ca scheme monofilare sau trifilare.

● **Scheme de principiu desfășurate.** În schemele de principiu desfășurate diferitele elemente ale unui aparat (bobine, contacte etc.) nu se mai reprezintă în același loc al schemei, ci se reprezintă în diversele

circuite în care intervin. Datorită acestui fapt, schema desfăşurată permite cu uşurinţă urmărirea succesivă a tuturor circuitelor şi operaţiilor, înţelegîndu-se mai bine funcţionarea elementelor din schemă.

Spre deosebire de schemele de principiu restrînse, schemele de principiu desfăşurate nu mai conţin şi reprezentarea circuitelor primare ale instalaţiilor protejate, ci conţin numai reprezentarea circuitelor secundare de protecţie sau automatizare; aceste circuite sînt denumite „circuite secundare" (ca şi circuitele în care intervin aparatele de măsurare) deoarece sînt alimentate de înfăşurările secundare ale transformatoarelor de curent şi de tensiune.

În schemele desfăşurate se reprezintă separat circuitele de curent alternativ alimentate de transformatoarele de curent, circuitele de curent alternativ alimentate de transformatoarele de tensiune şi circuitele de curent continuu.

Pentru ilustrare în figura 7.2, *a* este reprezentată schema desfăşurată a circuitelor de curent alternativ ale protecţiei maximale din figura 7.1, iar în figura 7.2, *b* este reprezentată schema desfăşurată a circuitelor de curent continuu ale aceleiaşi protecţii; în aceste scheme desfăşurate sînt folosite semnele convenţionale din tabelul 7.1.

Circuitele de curent continuu din schemele desfăşurate se reprezintă între două bare de alimentare, marcate cu plus şi minus, fiecare circuit fiind trasat perpendicular pe barele respective şi evitîndu-se încrucişarea circuitelor. După cum rezultă şi din figura 7.2, *b*, succesiunea circuitelor trebuie să reproducă succesiunea normală a operaţiilor care se efectuează în schemă.

Astfel, la închiderea contactului releului *1 RC* sau *2 RC* (ca urmare a creşterii curenţilor pe fazele *R* sau *T* pînă la valoarea curentului de pornire) este stabilit circuitul bobinei releului *RT*. Închiderea cu temporizare a contactului releului *RT* stabileşte circuitul bobinei releului *RI*, iar închiderea contactului acestui releu (după cum rezultă din ultimul circuit al schemei desfăşurate din figura 7.2, *b*) stabileşte circuitul bobinei de declanşare *BD*, întrucît în funcţionarea normală a liniei întrerupătorul *I* (fig. 7.1) este închis şi deci este închis şi contactul auxiliar *I* din circuitul bobinei de declanşare *BD*.

În schemele desfăşurate fiecare circuit se numerotează, pentru urmărirea mai uşoară a funcţionării.

Fig. 7.2. Exemplu de schemă desfăşurată:
a — circuitele de curent alternativ; *b* — circuitele de curent continuu.

2. Scheme de montaj

Schemele de montaj sînt utilizate pentru executarea montării aparatelor și conductoarelor de legătură care constituie protecția prin relee a unei instalații electroenergetice.

În schemele de montaj, care sînt schemele cu cea mai amănunțită reprezentare, sînt indicate aparatele cu așezarea lor pe panou, conductoarele de legătură, șirurile de cleme, fiind marcate toate elementele componente.

3. Scheme de amplasare

Pe lîngă schemele de principiu și schemele de montaj, pentru reprezentarea protecțiilor prin relee se folosesc și schemele de amplasare, în special în cazul instalațiilor electroenergetice care sînt echipate cu un număr important de protecții prin relee (uneori, în locul termenului *protecție prin relee* se folosește termenul *sistem de protecție prin relee*).

Într-o schemă de amplasare este reprezentată instalația electroenergetică protejată și sînt reprezentate pe același desen toate protecțiile prin relee (respectiv toate sistemele de protecție prin relee) prevăzute pentru instalația respectivă, fiind folosite semne convenționale speciale, indicate în tabelele 7.3 și 7.4.

În schemele de amplasare, care oferă o imagine de ansamblu asupra protecțiilor cu care este echipată o instalație electroenergetică, nu este obligatorie reprezentarea legăturilor dintre diversele protecții sau dintre protecții și transformatoarele de curent și de tensiune.

Pentru ilustrare, în figura 7.3 este reprezentată schema de amplasare corespunzătoare protecției maximale de curent a liniei din figura 7.1, folosind semnele convenționale din tabelele 7.3 și 7.4.

4. Scheme funcționale (scheme de elemente, scheme bloc)

În schemele funcționale se reprezintă prin dreptunghiuri diferitele elemente (blocuri) principale ale protecției, iar prin săgeți se reprezintă transmiterea semnalelor între elemente (blocuri), fără a se reprezenta componența fiecărui element (bloc).

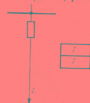


Fig. 7.3. Exemplu de schemă de amplasare.

Fiecare element (bloc) al schemei poate corespunde unui singur releu sau unui ansamblu de relee. Semnalul primit de un element la intrarea sa (de la elemente precedente din schemă) este denumit „mărime de intrare", iar semnalul pe care un element îl transmite spre elementele următoare este denumit „mărime de ieșire".

Schema din figura 1.1 este o schemă funcțională. Schemele funcționale au o utilizare deosebit de largă în automatică.

B. SEMNE CONVENȚIONALE UTILIZATE ÎN PROTECȚIA PRIN RELEE

1. Semne convenționale pentru contacte și bobine de relee

În conformitate cu STAS 1590/6-71 și 1590/8-71, în tabelul 7.1 sînt reprezentate semnele convenționale pentru contacte (utilizate în schemele de principiu restrînse și desfășurate) și pentru bobine ale releelor de protecție (utilizate în schemele de principiu desfășurate).

Tabelul 7.1

Semne convenționale pentru contactele și bobinele releelor de protecție

Denumirea semnului convențional	Semnul convențional
Contact normal deschis cu acționare instantanee	
Contact normal închis cu acționare instantanee	
Contact normal deschis cu temporizare la închidere	
Contact normal deschis cu temporizare la deschidere	
Contact normal închis cu temporizare la deschidere	
Contact normal închis cu temporizare la închidere	
Contact cu temporizare la închidere și deschidere a) normal deschis b) normal închis	a) b)
Contact comutator a) fără poziție neutră b) cu poziție neutră	a) b)
Contact cu zăvorîre mecanică a) normal deschis b) normal închis	a) b)

Denumirea semnului convențional	Semnul convențional
Bobină de releu (semn general)	
Bobină de releu a) cu o singură înfășurare b) cu două înfășurări	a) b)
Bobină de releu cu temporizare a) la acționare b) la revenire	a) b)
Bobină de releu polarizat	
Bobină de releu cu blocaj mecanic	
Bobină de releu cu contacte în gaze (releu reed)	

2. Semne convenționale pentru relee de protecție

În conformitate cu STAS 1590/8-71, în tabelul 7.2 sînt reprezentate semnele convenționale pentru relee de protecție, utilizate în schemele de principiu restrînse.

Tabelul 7.2

Semne convenționale pentru relee de protecție

Nr. crt.	Semn convențional	Denumirea semnului convențional
1	I	Releu de curent
2	I I/t	Releu de curent temporizat cu caracteristică dependentă și cu indicarea funcționării
3	I I I/t	Releu de curent temporizat cu caracteristică dependentă, cu element de acționare rapidă și cu indicarea funcționării

Nr. crt.	Semn convențional	Denumirea semnului convențional
4	Ih	Releu de curent homopolar
5	U	Releu de tensiune
6	U<	Releu de tensiune minimă
7	Uh	Releu de tensiune homopolară
8	I-I	Releu diferențial
9	I-I%	Releu diferențial cu bobină de frînare
10	→	Releu direcțional de putere
11	h →	Releu direcțional de putere homopolară
12		Releu intermediar
13		Releu intermediar cu temporizare prin intervenție în circuitul magnetic

Nr. crt.	Semn convențional	Denumirea semnului convențional
14	T	Releu de timp cu temporizare mecanică
15		Releu de semnalizare serie sau derivație
16		Releu de gaze
17	f	Releu de frecvență
18	t°	Releu de temperatură
19		Releu termic
20	Z	Releu de distanță (impedanță)
21	12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11	Releu compus (exemplu) NOTĂ: În interiorul dreptunghiului se poate reprezenta schema releului folosind pentru bobine și contacte simbolurile din tabelul 7.1
22	I	Exemplu: Releu de curent cu un contact normal deschis și unul normal închis

3. Semne convenționale pentru elemente și sisteme de protecție prin relee

În conformitate cu STAS 1590/8-81, în tabelul 7.3 sînt reprezentate semnele convenționale (folosite în schemele de amplasare) pentru elemente ale sistemelor de protecție prin relee, iar în tabelul 7.4 sînt reprezentate semnele convenționale pentru sistemele de protecție prin relee, folosite în schemele de amplasare.

Tabelul 7.3

Semne convenționale pentru elemente ale sistemelor de protecție

Nr. crt.	Semn convențional	Denumirea semnului convențional
1		Acționare prin declanșare (raportul laturilor 2/1)
2		Acționare prin semnalizare
3		Acționare prin declanșare și semnalizare
4	I	Element de curent
5	U	Element de tensiune
6	Ii	Element de curent de secvență inversă
7	Ui	Element de tensiune de secvență inversă
8	Ih	Element de curent de secvență homopolară
9	Uh	Element de tensiune de secvență homopolară
10	P	Element de putere
11	$\varphi_1 - \varphi_2$	Element de comparare a fazelor
12	f/I	Temporizare dependentă de curent
13	I-I	Element comparativ de curent
14	%	Element de bobină de frînare (stabilizare)

Nr. crt.	Semn convențional	Denumirea semnului convențional
15	⋈	Protecție diferențială transversală
16	—>	Element direcțional
17	T	Element de temporizare independent
18	Z	Element de distanță (impedanță)
19	φ	Element de blocaj contra curenților tranzitorii de dezechilibru
20	←→	Element de blocaj contra pendulărilor
21	Id+KIi	Filtru combinat (de ex. filtru Id + kIi)
22	I.F.	Instalație de curenți purtători de înaltă frecvență
23	●	Protecție de gaze
24	a) RARM b) RART c) RARM,T	Reanclanșare automată rapidă a) — monofazată b) — trifazată c) — mono și trifazată
25	AAR	Anclanșare automată a rezervei
26	a) DAS b) DAS-U c) DAS-F	Descărcare automată de sarcină: a) simbol general b) la tensiune c) la frecvență
27	RAS	Reanclașare după descărcarea automată de sarcină
28	DRRI	Declanșare de rezervă la refuzul întreruptorului

Nr. crt.	Semn convențional	Denumirea semnului convențional
29	RAT	Reglaj automat de tensiune
30	F.E.	Forțarea excitației
31	ADR	Automat de dezexcitare rapidă (stingerea cîmpului)
32	SyA	Sincronizarea automată sau semiautomată
33	DBS	Debuclare sistem

Tabelul 7.4

Semne convenționale pentru sisteme de protecție prin relee

Nr. crt.	Semn convențional	Denumirea semnului convențional
1	I	Protecție maximală de curent
2	I / →	Protecție maximală de curent, direcțională
3	I / T	Protecție maximală de curent cu temporizare independentă
4	I / f(I)	Protecție maximală de curent cu temporizare dependentă
5	I / T / →	Protecție maximală de curent cu temporizare independentă, direcțională
6	I / U< / T	Protecție maximală de curent cu blocaj de tensiune minimă și temporizare independentă

Nr. crt.	Semn convențional	Denumirea semnului convențional
7	I $U<$ T →	Protecție maximală de curent cu blocaj de tensiune minimă și temporizare independentă, direcțională
8	I_h	Protecție de curent homopolar
9	I_h →	Protecție de curent homopolar direcțională
10	I_h T	Protecție de curent homopolar cu temporizare independentă
11	I_h T →	Protecție de curent homopolar cu temporizare independentă, direcțională
12	$I-I$ ϕ	Protecție diferențială longitudinală cu element de blocaj contra curenților tranzitorii de dezechilibru
13	$I-I\%$ ϕ	Protecție diferențială longitudinală cu bobină de frînare și element de blocaj contra curenților tranzitorii de dezechilibru
14	$I-I\%$ T	Protecție diferențială longitudinală cu bobină de frînare și temporizare independentă
15	$I-I$ ⋈	Protecție diferențială transversală de curent
16	$I-I$ ⋈ →	Protecție diferențială transversală de curent, direcțională
17	$I-I$ ⋈ $U<$ →	Protecție diferențială transversală de curent, direcțională cu blocaj de minimă tensiune

Nr. crt.	Semn convențional	Denumirea semnului convențional
18	Ih-Ih ⋈	Protecție diferențială transversală de curent homopolar
19	Ih-Ih ⋈ →	Protecție diferențială transversală de curent homopolar, direcțională
20	Z z I II III →	Protecție de distanță cu pornire pe bază de impedanță minimă, cu trei trepte direcționale.
21	Z i I II III IV →	Protecție de distanță cu pornire pe bază de curent maxim, cu patru trepte, din care primele trei direcționale
22	$\varphi_1 - \varphi_2$ IF	Protecție de înaltă frecvență, diferențială, cu compararea fazei curenților. În dreptunghiul de sus se va specifica elementul de pornire
23	→ IF	Protecție de înaltă frecvență, cu blocaj direcțional de putere. În dreptunghiul de sus se va specifica elementul de pornire
24	Ph →	Protecție maximală de putere homopolară, direcțională
25	Ph t/P	Protecție maximală de putere homopolară cu temporizare dependentă
26	U< t/U	Protecție minimală de tensiune cu temporizare dependentă
27	U< T	Protecție minimală de tensiune cu temporizare independentă

Nr. crt.	Semn convențional	Denumirea semnului convențional
28	U · / T	Protecție maximală de tensiune cu temporizare independentă
29	Uh / T	Protecție de tensiune homopolară, cu temporizare independentă
30	●	Protecție de gaze (Buchholz)
31	I / T	Semnalizarea suprasarcinii
32	U ~	Semnalizarea defectării izolației la curent alternativ
33	U =	Semnalizarea defectării izolației la curent continuu
34	t°	Semnalizarea temperaturii
35	Ex - 1	Protecția contra primei puneri la pămînt a circuitelor rotorului
36	Ex - 2	Protecția contra celei de a doua puneri la pămînt a circuitelor rotorului
37	S >	Protecția contra mersului asincron la generator
38	dP/dt	Protecția contra variațiilor bruște de sarcină
39	Ih / ⏚	Protecția de cuvă
40	P / ← / T	Protecție de putere de sens invers, temporizată (contra întoarcerii de putere)

REZUMAT

● În schemele de principiu restrînse aparatele se reprezintă cu toate elementele lor în acelaşi loc din schemă.

● În schemele de principiu desfăşurate diferitele elemente ale unui aparat (bobine, contacte etc.) nu se mai reprezintă în acelaşi loc al schemei, ci se reprezintă în diversele circuite în care intervin. În schemele de principiu desfăşurate nu mai sînt reprezentate circuitele primare ale instalaţiilor protejate, ci numai circuitele secundare ale protecţiilor; în aceste scheme, circuitele de curent continuu sînt reprezentate între două bare de alimentare, una marcată cu plus, iar cealaltă cu minus.

● În schemele de montaj, utilizate pentru executarea montării aparatelor şi conductoarelor de legătură care constituie protecţia prin relee, sînt indicate aparatele cu aşezarea lor pe panou, conductoarele de legătură, şirurile de cleme, fiind marcate toate elementele componente.

● În schemele de amplasare, care oferă o imagine de ansamblu, sînt reprezentate pe acelaşi desen toate protecţiile prin relee prevăzute pentru o instalaţie electroenergetică protejată.

● În schemele funcţionale elementele (blocurile) principale ale unei protecţii sînt reprezentate prin dreptunghiuri, iar semnalele transmise între elemente (blocuri) sînt reprezentate prin săgeţi.

VERIFICAREA CUNOŞTINŢELOR

1. În ce categorie de scheme diferitele elemente ale aceluiaşi aparat se reprezintă în locuri şi circuite diferite?
   a) Scheme de principiu restrînse?
   b) Scheme de principiu desfăşurate?
   c) Scheme de amplasare?
2. Ce categorie de circuite sînt reprezentate (în schemele desfăşurate) între două bare, marcate cu plus şi minus?
   a) Circuitele de curent alternativ alimentate de transformatoarele de tensiune?
   b) Circuitele de curent alternativ alimentate de transformatoarele de curent?
   c) Circuitele de curent continuu?
3. În ce tip de scheme sînt reprezentate şirurile de cleme?
   a) Scheme de principiu?
   b) Scheme de montaj?
   c) Scheme funcţionale?
4. Cum se reprezintă transmiterea semnalelor în schemele funcţionale?
   a) Prin circuite electrice trifilare?
   b) Prin circuite electrice monofilare?
   c) Prin săgeţi?

CAPITOLUL 8

PROTECȚIA GENERATOARELOR SINCRONE RACORDATE LA BARE COLECTOARE

A. PROTECȚII PREVĂZUTE PENTRU GENERATOARE

1. Defecte și regimuri anormale ale generatoarelor

● **Defectele generatoarelor** pot fi în stator sau în rotor, precum și pe conductoarele de legătură de la bornele generatoarelor pînă la întrerupătorul acestora. Zona protejată de protecțiile generatoarelor este deci formată din circuitele de curent continuu de excitație și din circuitele de curent alternativ dintre neutrul bobinajelor statorice (în caz că neutrul este izolat) și întrerupător; dacă neutrul este legat la pămînt printr-o rezistență, atunci și aceasta este inclusă în zona protejată.

Cele mai frecvente defecte în stator sînt scurtcircuitele între faze, scurtcircuitele între spirele aceleiași faze și punerile la pămînt monofazate; toate acestea pot provoca deteriorări grave ale generatorului.

Dintre defectele rotorice, cele care apar mai des sînt punerea la pămînt într-un punct al circuitului de excitație (simpla punere la pămînt) și punerea la pămînt în două puncte ale circuitului de excitație (dubla punere la pămînt). Mai rar poate apărea o întrerupere a circuitului de excitație.

● **Regimurile anormale** cele mai importante sînt creșterile curentului statoric, numite *supraintensități*; acestea pot fi provocate fie de scurtcircuite exterioare, apărute în afara zonei protejate (de exemplu, pe barele colectoare sau pe o linie care pleacă de la aceste bare), fie de suprasarcini. Supraintensitățile pot determina o uzură importantă și îmbătrînirea izolației, de aceea pot fi admise numai pe intervale de timp limitate.

La hidrogeneratoare poate apărea un regim anormal reprezentat de creșterea tensiunii la borne în urma scăderii bruște a sarcinii, întrucît hidrogeneratoarele — datorită construcției lor — își pot mări mult turația în asemenea cazuri.

Printre regimurile anormale care apar mai rar poate fi menționat cel reprezentat de trecerea generatorului în regim de motor, provocată de un defect pe partea mecanică și de anularea cuplului motor la arborele turbinei care antrenează generatorul; rămînînd cuplat la bare, generatorul respectiv nu mai debitează putere în sistem, ci primește putere din sistem și trecere în regim de motor.

2. Tipuri de protecții prevăzute în normativ

În „Normativ pentru proiectarea instalațiilor de protecție prin relee și automatizare" al Ministerului Energiei Electrice, sînt prevăzute protecțiile pentru generatoarele racordate la bare colectoare, în funcție de puterea gene-

ratoarelor. Protecţiile prevăzute sînt următoarele:

— protecţia maximală de curent, împotriva supraintensităţilor provocate de scurtcircuite exterioare şi de suprasarcini;

— protecţia diferenţială longitudinală sau secţionarea de curent, împotriva scurtcircuitelor polifazate în stator;

— protecţia împotriva scurtcircuitelor între spirele aceleiaşi faze;

— protecţia homopolară împotriva punerilor la pămînt în stator;

— protecţia rotorului împotriva simplei şi dublei puneri la pămînt;

— protecţia împotriva reducerii accidentale a curentului de excitaţie şi a funcţionării în regim asincron;

— protecţia împotriva creşterii tensiunii la borne;

— protecţia împotriva funcţionării în regim de motor.

Pentru generatoarele cu puteri pînă la 3 MW, numărul protecţiilor prevăzute este mai mic, iar unele sînt simplificate ca realizare. Astfel, protecţia împotriva suprasarcinilor şi cea împotriva scurtcircuitelor între spirele aceleiaşi faze nu mai sînt prevăzute, protecţia împotriva scurtcircuitelor exterioare este sensibil simplificată, iar protecţia diferenţială longitudinală este înlocuită, în unele cazuri, printr-o protecţie mai simplă, numită secţionare de curent.

3. Funcţiunile protecţiilor generatoarelor

În cazul defectelor şi al regimurilor anormale periculoase pentru generator, protecţiile respective trebuie să comande declanşarea întrerupătorului generatorului, să transmită o semnalizare pentru avertizarea personalului de tură şi să comande acţionarea automatului de dezexcitare rapidă (ADR).

Prin declanşarea întrerupătorului se întrerupe alimentarea din sistem a defectului (apărut, de exemplu, în statorul generatorului), dar pentru ca defectul să fie cît mai repede lichidat şi efectele sale să fie cît mai reduse, este necesar ca şi alimentarea defectului de către generator să fie rapid limitată. Această limitare se obţine prin acţionarea ADR, care prin comutările efectuate introduce o rezistenţă în paralel cu circuitul rotoric şi întrerupe legătura dintre acest circuit şi excitatoare; totodată, pentru a se evita creşterea tensiunii la bornele excitatoarei (care rămîne în gol), un alt contact al ADR deşuntează o a doua rezistenţă şi o introduce în serie cu circuitul de excitaţie al excitatoarei, pentru a limita curentul din acest circuit.

Ca urmare a întreruperii alimentării circuitului rotoric şi a disipării rapide a energiei înmagazinate în circuit — prin punerea în paralel a primei rezistenţe menţionate cu circuitul rotoric — tensiunea electromotoare a generatorului scade foarte repede şi se obţine astfel limitarea rapidă a alimentării defectului apărut.

În cazul unor regimuri anormale sau defecte, care prin ele însele nu prezintă pericol pentru generator, ci numai prin posibilitatea transformării lor în defecte grave (cum este cazul, de exemplu, cu defectul reprezentat de simpla punere la pămînt în rotorul turbogeneratoarelor), protecţia prin relee nu comandă declanşarea întrerupătorului şi acţionarea ADR, ci numai transmiterea unei semnalizări pentru avertizarea personalului de tură.

1. Protecția generatoarelor de putere mai mare de 3 MW

Întrucît scurtcircuitele exterioare și suprasarcinile conduc la supraintensități, împotriva celor două regimuri anormale se realizează protecții maximale de curent în cadrul unei scheme comune. În cazul unei prime variante (fig. 8.1), schema cuprinde relee de curent, care sesizează creșterea curentului peste anumite limite, relee de timp, care asigură selectivitatea, relee de tensiune minimă, care permit ca protecția să se comporte diferit la scurtcircuite exterioare și la suprasarcini, acționînd corect în ambele regimuri, precum și relee de semnalizare serie și relee intermediare. În cazul unei alte variante (v. fig. 8.2), în schemă este inclus și un filtru de curent de secvență inversă FCSI.

Conform normativului, prima variantă este utilizată pentru generatoarele de puteri între 3 MW și 50 MW, iar a doua variantă este folosită pentru generatoarele de puteri mai mari decît 50 MW.

● **Varianta fără filtru de curent de secvență inversă.** Generatoarele sînt calculate astfel încît să suporte pe timp limitat anumite depășiri ale curentului nominal; datorită acestui fapt, supraintensitățile provocate de scurtcircuite exterioare și de suprasarcini pot fi lichidate cu temporizare. În cazul scurtcircuitelor exterioare, apărute, de exemplu, în punctul K_1 (v. fig. 8.1), este necesar ca protecția maximală de curent a generatorului să acționeze cu o temporizare mai mare decît timpul de acționare a protecției liniei pe care a apărut defectul, pentru ca această protecție să asigure lichidarea selectivă a scurtcircuitului, și numai în caz contrar să acționeze protecția generatorului.

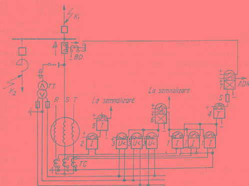


Fig. 8.1. Protecția maximală de curent (în varianta fără filtru de curent de secvență inversă) pentru generatoare de putere mai mare de 3 MW.

Cele trei relee de curent *1*, cele trei relee de tensiune minimă *3*, releul intermediar *6* și releul de timp *4* alcătuiesc protecția împotriva scurtcircuitelor exterioare, iar releul de curent *2* și releul de timp *5* formează protecția împotriva suprasarcinilor. Prima protecție comandă (prin intermediul releului de semnalizare serie *S* și al releului intermediar *7*, comun pentru mai multe protecții și denumit releu intermediar de ieșire) declanșarea întrerupătorului generatorului — stabilind curentul prin bobina de declanșare *BD* — și acționarea *ADR*, iar a doua protecție transmite numai o semnalizare, pentru avertizarea personalului de tură.

Releele de curent sînt alimentate de transformatoarele de curent *TC*, releele de tensiune minimă sînt alimentate de transformatorul de tensiune *TT*, iar circuitele în care intervin contactele releelor menționate, precum și bobinele și contactele releelor de timp și intermediare sînt alimentate cu curent operativ continuu de la bateria de acumulatoare; pe schemă, circuitele care sînt legate la borna pozitivă a bateriei sînt marcate cu +, iar cele legate la borna negativă cu —.

În cazul unui scurtcircuit exterior are loc creșterea curentului și scăderea importantă a tensiunii; ca urmare, releele *1* și *2* (cu contacte normal deschise) își închid contactele, ca și releele *3* (care au contacte normal închise); la scăderi importante ale tensiunii, acestea revin în starea normală (respectiv starea contactelor în absența alimentării bobinei), deci cu contactele închise.

Releele *3* comandă acționarea releului intermediar *6*, iar închiderea contactului inferior al acestuia asigură alimentarea contactelor releelor *1* și astfel (contactele releelor *1* fiind de asemenea închise) este comandată acționarea releului de timp *4* și apoi a releului intermediar de ieșire *7*.

Acționarea releului *2* — care are de asemenea loc la scurtcircuite exterioare — determină acționarea releului de timp *5*, destinat să asigure semnalizarea apariției suprasarcinilor; pentru ca releul *5* să nu determine semnalizări incorecte cînd apar scurtcircuite exterioare, temporizarea t_{a5} a acestui releu, timpul de acționare, trebuie să fie mai mare decît temporizarea t_{a4} a releului *4* (în acest fel, declanșarea întrerupătorului și lichidarea defectului au loc înainte ca releul *5* să-și închidă contactele), deci este necesară o condiție de forma:

$$t_{a5} > t_{a4}. \tag{8.1}$$

În practică, avînd în vedere că valoarea t_{a4} este de ordinul 4...6 s, se adoptă $t_{a5} = 10$ s.

În cazul unei suprasarcini, tensiunea nu suferă scăderi importante și releele *3* nu-și închid contactele, releul *6* rămîne cu contactele deschise și, ca urmare, închiderea contactelor releelor *1* — provocată de creșterea curentului în timpul suprasarcinii — nu poate comanda acționarea releelor *4* și *7*. La suprasarcini nu este deci comandată declanșarea întrerupătorului, ci are loc numai semnalizarea transmisă de releul *5* pentru avertizarea personalului de tură, care poate lua măsuri pentru reducerea suprasarcinii.

Contactul superior al releului *6* este prevăzut pentru ca în cazul arderii unor siguranțe ale transformatorului de tensiune *TT* (cînd unele dintre releele *3* își închid contactele) să fie transmisă o semnalizare personalului de tură, urmînd ca siguranțele arse să fie neîntîrziat schimbate.

Pentru stabilirea curentului de pornire al protecției maximale de curent *1* se folosește următoarea relație:

$$I_{pp1} = \frac{k_{sig}}{k_{rev}} I_n, \tag{8.2}$$

în care:

k_{sig} = 1,15...1,25 este coeficientul de siguranță supraunitar, introdus pentru asigurarea condiției (2.4);
k_{rev} = 0,85 — factorul de revenire al releelor;
I_n — curentul nominal al generatorului.

Înlocuind în relația (8.2) valorile indicate pentru k_{sig} și k_{rev}, se obține:

$$I_{pp1} = (1{,}35 \dots 1{,}45)\, I_n, \tag{8.3}$$

ceea ce arată că protecția maximală de curent *1* acționează la creșteri ale curentului cu 35...45% peste valoarea nominală.

Curentul de pornire al releelor *1* (curent secundar) se obține din relația (2.2):

$$I_{pr1} = \frac{I_{pp1}}{n_{TC}}, \tag{8.4}$$

unde n_{TC} este raportul de transformare al transformatoarelor de curent *TC* (v. fig. 8.1).

Înlocuind în relația (8.4) valoarea I_{pp1} din relația (8.2), rezultă:

$$I_{pr1} = \frac{k_{sig}}{k_{rev}} \cdot \frac{I_n}{n_{TC}}. \tag{8.5}$$

Curentul de pornire al protecției *2* se stabilește cu o relație analoagă cu relația (8.2), în care coeficientul de siguranță are valoarea:

$$k_{sig} = 1{,}05. \tag{8.6}$$

Rezultă astfel:

$$I_{pp2} = 1{,}20\, I_n. \tag{8.7}$$

Folosind relația (2.2), se poate scrie:

$$I_{pr2} = \frac{I_{pp2}}{n_{TC}}. \tag{8.8}$$

Se constată că protecția maximală de curent *2* acționează la creșterea curentului cu circa 20% peste valoarea nominală, transmițînd (după trecerea temporizării t_{a5} a releului de timp *5*) o semnalizare care avertizează personalul de tură că a apărut o suprasarcină.

Pentru blocajul de tensiune minimă realizat cu releele *3* se stabilește valoarea tensiunii de pornire U_{pp3} conform relației:

$$U_{pp3} = \frac{U_{min\ expl}}{k_{sig} k_{rev}}, \tag{8.9}$$

în care:

k_{sig} = 1,10...1,15 este coeficientul de siguranță supraunitar, introdus la numitorul expresiei (8.9) pentru asigurarea condiției (2.9);
k_{rev} = 1,15 — factorul de revenire al releelor minimale de tensiune *3*;
$U_{min\ expl} = 0{,}95\, U_n$ — tensiunea minimă de funcționare admisă în exploatare (avînd în vedere că se admit variații de ± 5% în jurul tensiunii nominale a generatorului U_n).

Din expresia (2.7) rezultă că tensiunea de pornire a releelor *3* (tensiunea secundară) se obține cu relația:

$$U_{pr3} = \frac{U_{pp3}}{n_{TT}}, \tag{8.10}$$

unde n_{TT} este raportul de transformare al transformatorului de tensiune *TT*.

Pentru ca în cazul unui scurtcircuit exterior (cum este cel din punctul K_1 din fig. 8.1) să se asigure posibilitatea unei lichidări selective — în sensul că protecția elementului defect să poată acționa mai devreme, și numai dacă defectul nu a fost lichidat, datorită, de exemplu, unui refuz de funcționare a acestei protecții, să urmeze acționarea protecției generatorului împotriva scurtcircuitelor exterioare — temporizarea t_{a4} a releului *4* se stabilește cu ajutorul relației:

$$t_{a4} = t_{a\ max} + \Delta t, \tag{8.11}$$

în care:

$t_{a\ max}$ este cea mai mare dintre temporizările protecțiilor maximale de curent ale instalațiilor care urmează după întrerupătorul generatorului, deci din exteriorul generatorului;

$\Delta t = 0{,}5...0{,}6$ s— o treaptă de temporizare care asigură selectivitatea, întrucît asigură o relație de forma:

$$t_{a4} > t_{a\ max}. \tag{8.12}$$

Schema din figura 8.1 are avantajul că asigură o funcționare corectă a protecției atît la scurtcircuite exterioare, cît și la suprasarcini. Această schemă are însă și dezavantaje, datorate valorii ridicate a curentului de pornire I_{pp1} definit de relația (8.3). Din expresia (2.1) rezultă că creșterea curentului de pornire micșorează coeficientul de sensibilitate, deci înrăutățește această calitate a protecției.

De asemenea, valoarea ridicată a curentului de pornire poate conduce la persistența unor scurtcircuite exterioare nesimetrice, care sînt periculoase pentru generatorul protejat. Astfel, de exemplu, în cazul unui scurtcircuit bifazat în punctul K_2, după bobina de reactanță montată pe o linie, valoarea curentului poate fi inferioară valorii I_{pp1} din relația (8.3), deoarece bobina de reactanță limitează mult curentul de defect. Ca urmare, dacă protecția liniei defecte nu acționează corect și nu asigură lichidarea defectului, protecția maximală de curent a generatorului nu poate acționa — nefiind îndeplinită condiția (2.3) — și generatorul continuă să alimenteze scurtcircuitul.

În cazul defectului bifazat considerat apare însă componenta de secvență inversă a curentului, care poate provoca încălziri nepermise și vibrații ale generatorului, întrucît creează un cîmp magnetic care se rotește în raport cu rotorul, cu o viteză egală cu dublul vitezei unghiulare a acestuia.

Datorită efectelor periculoase menționate, valoarea componentei de secvență inversă $I_{2\ adm}$ admisă pentru funcționarea îndelungată este limitată la generatoare; la turbogeneratoare se prevede o valoare:

$$I_{2\ adm} = 0{,}08\ I_n, \tag{8.13}$$

deci nu se admite ca valoarea curentului de secvență inversă I_2 să depășească 8% din curentul nominal I_n al generatorului, iar la hidrogeneratoare se prevede valoarea:

$$I_{2\ adm} = 0{,}12\ I_n. \tag{8.14}$$

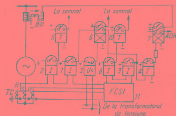


Fig. 8.2. Protecția maximală de curent (în varianta cu filtru de curent de secvență inversă) pentru generatoare de putere mai mare de 50 MW.

Întrucît varianta din figura 8.1 are o sensibilitate redusă și nu poate asigura valorile admisibile ale componentei de secvență inversă din relațiile (8.13) și (8.14), pentru generatoarele de puteri mai mari de 50 MW se folosește varianta cu filtru de curent de secvență inversă *(FCSI)*.

● **Varianta cu filtru de curent de secvență inversă.** Protecția împotriva suprasarcinilor, realizată cu releele *2* și *5*, nu se deosebește de cea din figura 8.1. În schema din figura 8.2, releele *1*, *3* și *6* reprezintă o protecție maximală de curent împotriva scurtcircuitelor exterioare trifazate simetrice, care nu sînt însoțite de apariția componentei de secvență inversă I_2; deoarece în cazul scurtcircuitelor trifazate simetrice toate fazele se găsesc în aceleași condiții, în schemă este prevăzut un singur releu *1* și un singur releu *3*, spre deosebire de varianta din figura 8.*1*, unde apăreau cîte trei relee. Pentru protecția realizată cu releele *1*, *3* și *6*, valorile de reglaj se stabilesc ca și în cazul schemei din figura 8.1.

În varianta din figura 8.2 apar în plus (față de schema din figura 8.1) releele de curent *8* și *9*, alimentate de filtrul de curent de secvență inversă *11*, precum și releul de timp *10*, care comandă o semnalizare.

Releele *8* și *10* împreună cu filtrul *11* formează o protecție foarte sensibilă împotriva regimurilor însoțite de apariția componentei de secvență inversă I_2 a curentului; valoarea de pornire $I_{2\,pp8}$ a protecției *8* se stabilește cu relația:

$$I_{2\,pp8} = k_{sig} I_{2\,adm}, \tag{8.15}$$

în care:

k_{sig} este coeficientul de siguranță supraunitar;

I_{2adm} — valoarea rezultată din relația (8.13), respectiv (8.14), după tipul generatorului.

Protecția realizată cu releele *8* și *10* semnalizează apariția unor componente de secvență inversă cu valori reduse, care însă depășesc un anumit prag fixat peste valorile admisibile $I_{2\,adm}$.

Releul *10* are temporizarea:

$$t_{a10} = 10 \text{ s}. \tag{8.16}$$

Releul *9*, împreună cu filtrul *11* și releul de timp *4* — care intervine și în schema protecției împotriva scurtcircuitelor exterioare simetrice — formează o protecție care acționează la apariția unor componente de secvență inversă cu valori mai ridicate (decît cele corespunzătoare acționării protecției formate din releele *8* și *10*) și comandă declanșarea întrerupătorului și ADR.

Pentru protecția *9*, valoarea de pornire $I_{2\,pp9}$ se stabilește cu relația:

$$I_{2\,pp9} = (0{,}25 \dots 0{,}6)\, I_n, \tag{8.17}$$

în care I_n este curentul nominal al generatorului.

Comparînd relațiile (8.3) și (8.17), se constată că protecția *9* are un curent de pornire mult mai mic decît protecția *1* din schema reprezentată în figura 8.1; ca urmare, întrucît curentul de pornire intervine la numitorul coeficientu-

lui de sensibilitate definit de relaţia (2.1), rezultă că varianta cu filtru are o sensibilitate mai ridicată decît varianta fără filtru.

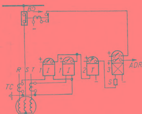


Fig. 8.3. Protecţia maximală de curent a generatoarelor de putere mai mică de 3 MW.

2. Protecţia generatoarelor de putere pînă la 3 MW inclusiv

Pentru aceste generatoare nu se prevede protecţia împotriva suprasarcinilor, iar protecţia împotriva scurtcircuitelor exterioare se realizează simplificat, numai cu două transformatoare şi cu două relee de curent, fără blocaj de tensiune minimă. Întrucît în multe cazuri generatoarele de puteri mici nu au neutrul accesibil (nefiind prevăzute borne ale bobinajelor statorice spre neutru), transformatoarele de curent se montează pe conductoarele de legătură cu barele colectoare, rezultînd schema din figura 8.3.

Deşi transformatoarele şi releele de curent sînt montate numai pe două faze, protecţia acţionează la orice tip de scurtcircuit exterior între faze: întrucît întotdeauna cel puţin două faze sînt afectate de defect, cel puţin unul din transformatoarele de curent este parcurs de curentul de scurtcircuit, şi deci acţionează cel puţin unul dintre cele două relee de curent.

Valorile de reglaj pentru releele de curent *1* şi releul de timp *2* se determină cu expresii analoage cu cele din relaţiile (8.2) şi 8.11).

C. PROTECŢIA GENERATOARELOR ÎMPOTRIVA SCURTCIRCUITELOR DINTRE FAZELE STATORULUI

1. Protecţia diferenţială longitudinală

Protecţia maximală de curent nu poate constitui o protecţie de bază împotriva scurtcircuitelor între fazele statorului, deoarece acţionează cu temporizare, iar scurtcircuitele din stator trebuie lichidate foarte rapid, pentru a se reduce deteriorarea generatorului.

Protecţia de bază a generatoarelor cu puteri de 3 MW sau mai mari împotriva scurtcircuitelor între fazele statorului este protecţia diferenţială longitudinală. Protecţia se realizează prin intermediul unei scheme diferenţiale, instalîndu-se transformatoarele de curent la cele două capete ale înfăşurării statorice, adică ale zonei protejate.

Funcţionarea unei scheme diferenţiale — pentru o singură fază — este ilustrată în figura 8.4, folosindu-se notaţii prin săgeţi pentru sensurile convenţionale ale curenţilor. Circuitul diferenţial se obţine legînd bornele de intrare şi ieşire ale bobinajelor secundare ale transformatoarelor de curent TC_1 şi TC_2 (avînd acelaşi raport de transformare) în modul reprezentat în figura 8.4, în derivaţie cu circuitul diferenţial obţinut fiind conectată bobina unui releu de curent *RC*.

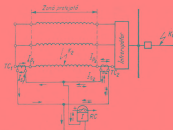


Fig. 8.4. Realizarea protecției diferențiale longitudinale pentru unul dintre bobinajele statorului generatorului.

● **Calitățile protecției diferențiale longitudinale.** În regim normal de funcționare, sau la un scurtcircuit exterior în punctul K_1, are loc egalitatea curenților primari I_{p1} și I_{p2} de la capetele zonei protejate, fiind aproximativ egali și curenții secundari I_{s1} și I_{s2}. Ca urmare, avînd în vedere sensurile convenționale de circulație a celor doi curenți secundari prin bobina releului RC, se constată că valoarea curentului prin bobina releului este determinată de diferența celor doi curenți secundari și releul RC nu acționează, valoarea diferenței respective fiind redusă.

La un scurtcircuit în interiorul zonei protejate, în punctul K_2, se schimbă sensul convențional al unuia dintre curenții primari — defectul fiind alimentat și de sistemul electric — și circulația curenților din bucla din dreapta a circuitului diferențial are aspectul ilustrat prin săgețile întrerupte (valorile absolute ale tuturor curenților se modifică de asemenea în raport cu cazul defectului din punctul K_1). Datorită acestei schimbări, prin bobina releului RC circulă suma curenților secundari, deci un curent foarte mare, proporțional cu curentul total de scurtcircuit, și releul RC acționează.

Se constată astfel că protecția diferențială satisface condiția de selectivitate, comportîndu-se în mod diferit la defecte în zonă și la defecte exterioare.

De asemenea, deoarece protecția nu acționează în regim normal de funcționare a generatorului, asigurarea condiției (2.4) nu mai este necesară, și deci curentul de pornire poate fi mai mic decît curentul nominal; valorile reduse ale curentului de pornire asigură — conform relației (2.1) — o sensibilitate ridicată a protecției diferențiale.

● **Dificultăți în realizarea protecției diferențiale longitudinale.** Pentru transformatoarele de curent de la cele două capete ale zonei protejate (transformatoarele TC_1 și TC_2 din figura 8.4) nu pot fi obținute caracteristici magnetice identice, existînd deci diferențe între curenții de magnetizare ai acestor transformatoare. Ca urmare apare o diferență între curenții secundari, chiar în cazul cînd curenții primari sînt egali, în regim normal de funcționare și în cazul unui scurtcircuit exterior.

În aceste regimuri, prin bobina releului RC circulă un curent egal cu diferența celor doi curenți secundari, numit *curent de dezechilibru*. Curentul de dezechilibru crește cu cît curentul primar crește, valoarea maximă a curentului de dezechilibru — notată cu $I_{dez\ max}$ — rezultînd în cazul celui mai apropiat scurtcircuit exterior trifazat, întrucît în acest caz și curentul primar are valoarea maximă.

Prezența curentului de dezechilibru impune pentru curentul de pornire al releului RC (fig. 8.4) asigurarea unei condiții de forma:

$$I_{pr} = k_{sig} I_{dez\ max} \tag{8.18}$$

(k_{sig} este un coeficient de siguranță supraunitar), pentru ca protecția diferențială să nu acționeze greșit în cazul scurtcircuitelor exterioare.

Condiția (8.18) poate conduce însă la valori ridicate ale curentului de pornire al releului I_{pr} și ale curentului de pornire al protecției I_{pp} — valorile acestor curenți fiind legate prin relația (2.2) — rezultînd astfel micșorarea sensibilității protecției, în conformitate cu expresia (2.1).

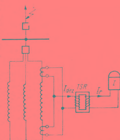


Fig. 8.5. Introducerea *TSR* în schema protecției diferențiale longitudinale (pentru o fază).

Pentru mărirea sensibilității se intercalează un mic transformator pe legăturile spre bobina releului (fig. 8.5), numit *transformator cu saturație rapidă* și notat cu *TSR*; denumirea acestui transformator se datorește faptului că la curba de magnetizare a miezului cotul de saturație apare la valori mici ale cîmpului, porțiunea inițială a curbei fiind abruptă; datorită acestui aspect al curbei de magnetizare, componentele aperiodice se transformă în condiții foarte proaste.

Astfel, curentul de dezechilibru I_{dez} care circulă prin bobinajul primar al *TSR* (fig. 8.5) conține o importantă componentă aperiodică, și aceasta se transformă numai în slabă măsură; ca urmare, în bobinajul secundar al *TSR* — care alimentează releul de curent — circulă un curent I_r de valoare redusă și releul nu acționează, deși curentul de dezechilibru I_{dez} poate avea valori ridicate.

Se constată astfel că introducerea *TSR* permite adoptarea unor curenți de pornire mai mici decît cei care rezultă din relația (8.18), obținîndu-se astfel — conform relației (2.1) — mărirea sensibilității.

Creșterea curentului de dezechilibru în cazul scurtcircuitelor exterioare este determinată de creșterea importantă a curenților de magnetizare ai transformatoarelor de curent care alimentează protecția, ca urmare a saturației circuitelor magnetice ale acestor transformatoare de curent și a prezenței componentei aperiodice a curentului de scurtcircuit.

Transformatoarele *TSR* sînt utilizate și în unele protecții diferențiale ale transformatoarelor de putere și ale barelor colectoare, pentru mărirea sensibilității.

Pentru mărirea sensibilității protecției diferențiale a generatoarelor se utilizează și relee cu acțiune de frînare; deoarece aceste relee sînt mai frecvent folosite în cazul protecției diferențiale a transformatoarelor, ele sînt descrise în capitolul 9.

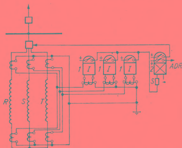


Fig. 8.6. Schema trifilară a protecției diferențiale longitudinale cu *TSR*.

● **Scheme trifilare ale protecțiilor diferențiale longitudinale.** Schema trifilară a protecției diferențiale cu *TSR* este reprezentată în figura 8.6. Transformatoarele de curent

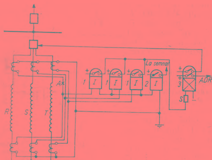


Fig. 8.7. Schema trifilară a protecției diferențiale longitudinale fără *TSR*.

sînt montate pe toate trei fazele, releele de curent *1* fiind alimentate prin intermediul *TSR*. Releele de curent comandă releul intermediar de ieșire *2*, care asigură declanșarea întrerupătorului și acționarea *ADR*; pe legătura de la contactele releelor *1* la bobina releului *2* este intercalat releul de semnalizare serie *S*.

Fiind selectivă, protecția diferențială nu necesită introducerea unor temporizări, deci îndeplinește și condiția de rapiditate; ca urmare, în schemă nu apar relee de timp.

Avînd în vedere mărirea sensibilității datorită prezenței *TSR*, pentru curentul de pornire I_{pp1} al protecției *1* se alege o valoare inferioară curentului nominal I_n al generatorului

$$I_{pp1} = (0{,}5...0{,}6)\, I_n. \qquad (8.19)$$

La turbogeneratoare de puteri pînă la 50 MW, normativul admite adoptarea valorii:

$$I_{pp} = (1{,}3...1{,}4)\, I_n. \qquad (8.20)$$

Întrucît această valoare, relativ ridicată, asigură de regulă și îndeplinirea condiției (8.18), în schema din figura 8.7 nu mai sînt necesare *TSR*. În unele cazuri se introduc *TSR* și în schema din figura 8.7, îndeosebi dacă transformatoarele de curent care alimentează protecția diferențială nu au o clasă de precizie ridicată.

Releul de curent *2* are rolul de a semnaliza apariția unei întreruperi, de exemplu în punctul *A* al unui circuit secundar și, în acest scop, curentul de pornire I_{pp2} trebuie să fie inferior curentului nominal I_n al generatorului, folosindu-se relația:

$$I_{pp2} = 0{,}2\, I_n. \qquad (8.21)$$

2. Secționarea de curent

Pentru generatoarele de puteri mai mici de 3 MW, care nu au borne accesibile spre neutru, nu poate fi folosită protecția diferențială, întrucît nu pot fi montate transformatoarele de curent spre neutru. La aceste generatoare

se prevede o protecţie mai simplă împotriva scurtcircuitelor dintre fazele statorului, numită *secţionarea de curent*.

Secţionarea de curent (fig. 8.8) se realizează cu transformatoare de curent şi cu relee de curent montate pe două faze, releele de curent *1* comandînd prin releul intermediar de ieşire *2*, declanşarea întrerupătorului şi *ADR*.

Întrucît în schemă nu sînt prevăzute temporizări, şi deci selectivitatea nu poate fi asigurată pe această cale — cum este cazul la protecţiile maximale de curent — funcţionarea selectivă se asigură prin alegerea curentului de pornire, astfel încît să nu fie posibile acţionări greşite la scurtcircuite exterioare. În acest scop, curentul de pornire I_{pp1} se alege mai mare decît cel mai mare curent de scurtcircuit care poate fi debitat de generator la defecte exterioare, fiind folosită relaţia:

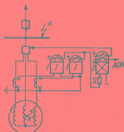


Fig. 8.8. Schema trifilară a secţionării de curent pentru generatoare.

$$I_{pp1} = k_{sig} I''_{sc\,max\,K}, \qquad (8.22)$$

în care:

$k_{sig} = 1,2 \ldots 1,3$ este coeficientul de siguranţă;

$I''_{sc\,max\,K}$ — valoarea supratranzitorie a componentei periodice a curentului de scurtcircuit pentru un defect trifazat apărut în punctul K — cel mai apropiat punct exterior zonei protejate — în regim maxim de funcţionare.

În cazul unui scurtcircuit în stator, de exemplu în punctul K', transformatoarele de curent sînt parcurse de curentul de defect debitat de sistem şi de generatoarele funcţionînd în paralel cu cel protejat; acest curent este mai mare decît curentul de pornire I_{pp1} şi protecţia acţionează corect.

D. PROTECŢIA GENERATOARELOR ÎMPOTRIVA SCURTCIRCUITELOR ÎNTRE SPIRELE ACELEIAŞI FAZE

1. Principii de realizare

Realizarea protecţiei împotriva scurtcircuitelor dintre spirele aceleiaşi faze este mai simplă la generatoarele cu două înfăşurări paralele pe fiecare fază, o asemenea construcţie fiind de regulă utilizată pentru generatoare de puteri egale sau mai mari de 50 MW.

La aceste generatoare, impedanţele celor două înfăşurări paralele sînt aproximativ egale şi, ca urmare, curenţii primari din cele două înfăşurări (de exemplu, curenţii I_{p1} şi I_{p2} din fig. 8.9) sînt practic egali în regim normal de funcţionare sau la un scurtcircuit exterior generatorului.

Montînd cîte un transformator de curent în circuitul fiecărei înfăşurări şi legînd borna de intrare a bobinajului secundar al primului transformator

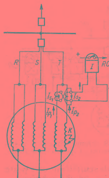


Fig. 8.9. Realizarea protecţiei diferenţiale transversale pentru cele două înfăşurări ale unei faze.

cu borna de ieşire a bobinajului secundar al celuilalt transformator şi reciproc, se formează un circuit diferenţial transversal, numit şi circuit „în opt", din cauza formei sale. Conectînd releul de curent *RC* în paralel cu acest circuit, se constată — urmărind sensurile convenţionale ale curenţilor — că în regimurile considerate prin bobina releului circulă diferenţa curenţilor secundari I_{s1} şi I_{s2}, deci un curent de valoare redusă, de natura unui curent de dezechilibru.

În cazul unui scurtcircuit între spirele uneia dintre înfăşurări, de exemplu în *K*, curenţii primari I_{p1} şi I_{p2} nu mai sînt egali şi curenţii secundari I_{s1} şi I_{s2} au valori diferite: ca urmare, curentul prin bobina releului — egal cu diferenţa curenţilor secundari — are o valoare importantă, determinînd acţionarea releului.

În acest mod, protecţia analizată, numită *protecţie diferenţială transversală*, acţionează la scurtcircuite între spire şi nu acţionează la funcţionarea în regim normal sau la scurtcircuite exterioare.

La generatoarele care nu au două bobinaje pe fază, protecţia împotriva scurtcircuitelor între spirele aceleiaşi faze se poate realiza ca protecţie de tensiune homopolară, cu un releu de tensiune care controlează apariţia componentei de secvenţă homopolară a tensiunii U_0. În regim normal această componentă are valori practic nule, iar la apariţia unui scurtcircuit între spire capătă valori importante, deoarece din cauza defectului tensiunile electromotoare ale celor trei faze nu mai formează o stea simetrică şi ca urmare apare componenta homopolară U_0.

2. Schema trifilară a protecţiei diferenţiale transversale cu şase transformatoare de curent

Schema trifilară din figura 8.10 rezultă din extinderea schemei din figura 8.9 la toate trei fazele, unele conductoare ale celor trei scheme diferenţiale fiind comune. Cele trei relee de curent *1* conectate prin intermediul celor trei transformatoare *TSR* (care au rolul de a mări sensibilitatea, ca şi în cazul protecţiei diferenţiale longitudinale), comandă releul intermediar de ieşire *2*, iar acesta transmite comenzi la declanşarea întrerupătorului şi la acţionarea *ADR*.

Datorită prezenţei *TSR*, pentru curentul de pornire I_{pp1} se poate alege o valoare inferioară curentului nominal I_n al generatorului, folosindu-se relaţia:

$$I_{pp1} = (0{,}3 \ldots 0{,}4)\, I_n. \tag{8.23}$$

Schema din figura 8.10 are dezavantajul unui cost ridicat, necesitînd şase transformatoare de curent şi de aceea se utilizează din ce în ce mai rar, fiind folosită varianta cu un singur transformator de curent, expusă în paragraful următor.

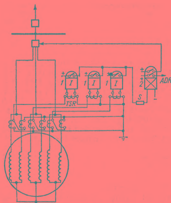


Fig. 8.10. Schema trifilară a protecției diferențiale transversale cu șase transformatoare de curent.

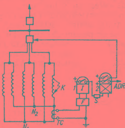


Fig. 8.11. Schema trifilară a protecției cu un transformator de curent.

3. Schema trifilară a protecţiei împotriva scurtcircuitelor între spire, realizată cu un transformator de curent

După cum se constată din figura 8.11, cu cele două grupuri de cîte trei înfăşurări se realizează două neutre, N_1 şi N_2, pe legătura dintre aceste neutre instalîndu-se transformatorul de curent *TC*. Acest transformator alimentează — prin intermediul filtrului de armonici superioare *F* — releul de curent *1*, care comandă releul intermediar de ieşire *2*.

În absenţa unui scurtcircuit între spire, cele două neutre N_1 şi N_2 se găsesc la acelaşi potenţial şi prin transformatorul *TC* nu circulă curent, deci releul *1* nu acţionează. Dacă apare un scurtcircuit între spire, de exemplu în *K*, atunci neutrele N_1 şi N_2 se găsesc la potenţiale diferite (întrucît cele două grupuri de cîte trei înfăşurări nu se mai găsesc în condiţii identice), deci prin transformatorul *TC* circulă un curent şi releul *1* acţionează comandînd releul intermediar 2.

Filtrul de armonici superioare *F* este necesar pentru ca armonicele 3 şi multiplu de 3, care apar şi în regim normal datorită curbei deformate a curentului, să nu determine acţionări greşite ale protecţiei în absenţa scurtcircuitelor între spire. În componenţa filtrului intră un transformator auxiliar şi un condensator montat în paralel cu bobina releului.

Curentul de dezechilibru fiind mic, se poate adopta pentru curentul de pornire I_{pp1} o valoare mai redusă decît cea din expresia (8.23), fiind utilizată relaţia:

$$I_{pp1} = (0{,}2\ldots0{,}3)\,I_n. \tag{8.24}$$

Se constată că pe lîngă avantajul de a fi mai ieftină, varianta din figura 8.11 are şi avantajul de a fi mai sensibilă decît varianta din figura 8.10, întrucît micşorarea curentului de pornire conduce — conform relaţiei (2.1) — la mărirea coeficientului de sensibilitate.

E. PROTECŢIA GENERATOARELOR ÎMPOTRIVA PUNERILOR LA PĂMÎNT ÎN STATOR

1. Principii de realizare

În cazul punerii la pămînt a unei faze a statorului (rezultînd din străpungerea izolaţiei dintre fază şi masa metalică a generatorului), curenţii de defect au valori mici, deoarece — la generatoarele cu neutrul izolat — închiderea circuitului prin care circulă aceşti curenţi este realizată prin capacităţile dintre celelalte două faze şi pămînt, precum şi prin capacităţile faţă de pămînt ale diverselor instalaţii legate galvanic cu generatorul protejat (alte generatoare funcţionînd în paralel cu primul, linii de plecare de la bare etc.). Capacităţile menţionate au valori reduse, şi deci reactanţele capacitive corespunzătoare X_c au valori mari, fiind definite de relaţia:

$$X_c = \frac{1}{\omega C}, \qquad (8.25)$$

în care:

C este valoarea capacităţii respective;

$\omega = 2\pi f$ — pulsaţia corespunzătoare frecvenţei industriale $f = 50$ Hz.

La unele generatoare, neutrul este legat la pămînt printr-o rezistenţă, care este aleasă astfel încît să limiteze pînă la valori reduse curenţii de defect, în cazul unei puneri la pămînt în stator.

Deşi au valori mici, curenţii de punere la pămînt monofazată în stator prezintă pericol pentru generator, întrucît s-a constatat că începînd de la valoarea de 5 A a acestor curenţi arcul din punctul defectului poate provoca topirea tolelor statorului. În acest caz, repararea generatorului necesită desfacerea pachetului de tole, deci reprezintă o operaţie costisitoare, care determină scoaterea din funcţiune a generatorului pentru o perioadă îndelungată.

Pentru a elimina posibilitatea unor asemenea deteriorări ale generatorului, prescripţiile în vigoare la noi în ţară prevăd ca la toate generatoarele la care curentul $I_{păm}$, apărut la o punere la pămînt într-un punct al bobinajului statoric, atinge sau depăşeşte valoarea de 5 A, să fie instalate protecţii care să comande declanşarea întrerupătorului generatorului. Condiţia pentru ca protecţia să acţioneze la declanşare are deci aspectul:

$$I_{păm} \geqslant 5\text{A}. \qquad (8.26)$$

Valorile reduse ale curentului de defect la puneri la pămînt monofazate în stator arată că protecţiile respective trebuie să fie deosebit de sensibile, problema sensibilităţii fiind de fapt în acest caz o problemă primordială. Ca urmare, releele folosite în componenţa acestor protecţii trebuie să fie, de asemenea, foarte sensibile.

Întrucît la defecte însoţite de contact cu pămîntul apare componenta de secvenţă homopolară a tensiunii şi curentului, protecţia generatoarelor împotriva punerilor la pămînt în stator se realizează pe principiul controlului valorii componentei de secvenţă homopolară I_0 a curentului, în schema protecţiei fiind folosite dispozitive de obţinere a unei mărimi proporţionale cu componenta I_0.

Dispozitivele cele mai frecvent folosite în acest scop sînt: filtrul de componentă de secvenţă homopolară a curentului *(FCSH)* şi transformatorul de secvenţă homopolară *(TSH)*.

● **Filtrul FCSH.** Ținînd seamă că între componenta de secvență homopolară $\underline{I}_0$ și curenții celor trei faze există relația:

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T}{3}, \qquad (8.27)$$

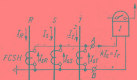


Fig. 8.12. Filtrul de curent de secvență homopolară (*FCSH*).

filtrul *FCSH* poate fi realizat conform schemei din figura 8.12, legînd în paralel bobinajele secundare ale transformatoarelor de curent de pe cele trei faze și alimentînd de la cele două borne comune (*A* și *B*) bobina releului de curent. Considerînd că cele trei transformatoare de curent au caracteristici identice și neglijînd curenții lor de magnetizare, cu ajutorul sumei fazoriale a curenților secundari $\underline{I}_{sR}$, $\underline{I}_{sS}$, $\underline{I}_{sT}$ (această sumă reprezentînd curentul $\underline{I}_r$ prin bobina releului) se obține următoarea expresie, analoagă cu cea din relația (8.27):

$$\underline{I}_0 \simeq \frac{\underline{I}_{sR} + \underline{I}_{sS} + \underline{I}_{sT}}{k}, \qquad (8.28)$$

iar pentru curentul prin releu rezultă:

$$\underline{I}_r = \underline{I}_{sR} + \underline{I}_{sS} + \underline{I}_{sT} \simeq k\underline{I}_0. \qquad (8.29)$$

În relațiile (8.28) și (8.29), factorul k apare ca urmare a trecerii de la curenții primari $\underline{I}_R$, $\underline{I}_S$, $\underline{I}_T$ — care figurează în expresia (8.27) — la curenții secundari $\underline{I}_{sR}$, $\underline{I}_{sS}$, $\underline{I}_{sT}$, iar aproximația egalităților menționate se datorește neglijării curenților de magnetizare și faptului că cele trei transformatoare de curent nu au caracteristici identice, așa cum s-a considerat.

Din relația (8.29) se constată că curentul prin releu $\underline{I}_r$, debitat de *FCSH*, depinde de componenta homopolară $\underline{I}_0$. În absența unei puneri la pămînt, componenta homopolară este nulă, deci:

$$\underline{I}_0 = 0 \qquad (8.30)$$

și prin releu circulă numai un curent de dezechilibru, respectiv:

$$\underline{I}_r = \underline{I}_{dez}, \qquad (8.31)$$

determinat de neidentitatea caracteristicilor celor trei transformatoare de curent și de prezența curenților lor de magnetizare.

Pentru ca releul să nu acționeze greșit în absența punerilor la pămînt, este necesar ca pentru determinarea curentului de pornire al releului I_{pr} să se utilizeze relația:

$$I_{pr} = k_{sig} I_{dez\,max}, \qquad (8.32)$$

în care:

k_{sig} este coeficientul de siguranță supraunitar;

$I_{dez\,max}$ — valoarea maximă a curentului de dezechilibru.

Întrucît curentul de dezechilibru crește odată cu creșterea curentului primar, valoarea maximă $I_{dez\,max}$ apare (ca și în cazul protecțiilor diferențiale longitudinale) în cazul celui mai apropiat scurtcircuit exterior trifazat.

La apariția unei puneri la pămînt apare componenta homopolară I_0 și valoarea curentului prin releu I_r, crește mult (în comparație cu valoarea

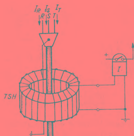


Fig. 8.13. Transformatorul de secvență homopolară (*TSH*).

$I_r = I_{dez}$ existentă în absența defectului), devenind $I_r \simeq kI_0$, conform relației (8.29), ceea ce determină acționarea releului.

● **Transformatorul TSH.** Acest transformator are un miez circular sau dreptunghiular, pe care se găsește bobinajul secundar care alimentează releul de curent, iar primarul transformatorului este format din conductoarele celor trei faze. De exemplu, în cazul unui generator legat la barele colectoare printr-un cablu, aspectul *TSH* este reprezentat în figura 8.13.

În absența unei puneri la pămînt are loc relația (8.30) și, deci, conform expresiei (8.27), suma fazorială a curenților primari este nulă:

$$\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T = 0. \qquad (8.33)$$

Ca urmare este nulă și suma fazorială a fluxurilor determinate de curenții primari în miezul *TSH*, obținîndu-se un flux rezultant nul, și deci o tensiune electromotoare nulă indusă în bobinajul secundar care alimentează releul; datorită acestui fapt, releul nu acționează.

Întrucît *TSH* are un singur miez, nu apar curenți de dezechilibru de tipul celor menționați în cazul *FCSH* (realizat cu trei transformatoare de curent, deci cu trei miezuri avînd în mod inerent anumite deosebiri între caracteristicile magnetice), dar apar curenți de dezechilibru de alt tip, datorați unui anumit grad de nesimetrie între bobinajul secundar și conductoarele care formează primarul *TSH*.

Acest curent de dezechilibru este însă mai mic decît cel care apare la *FCSH*.

În cazul unei puneri la pămînt în stator apare componenta homopolară $\underline{I}_0$, relația (8.30) nu mai are loc, rezultînd:

$$\underline{I}_0 \neq 0. \qquad (8.34)$$

Ca urmare, conform expresiei (8.27) se obține:

$$\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T \neq 0, \qquad (8.35)$$

deci suma fazorială a curenților primari nu mai este nulă. Datorită acestui fapt nu mai este nulă nici suma fazorială a fluxurilor determinate de curenții primari în miezul *TSH*, obținîndu-se deci un flux rezultant care nu mai este nul și care induce tensiuni electromotoare de valori importante în bobinajul secundar al *TSH*, determinînd circulația unui curent important prin bobina releului și acționarea acestuia.

2. Scheme de protecție cu FCSH

Pentru a se mări sensibilitatea protecției, deci pentru a se putea adopta un curent de pornire mai mic decît cel definit de relația (8.32), se poate introduce o temporizare 1—2 s, întrucît în acest timp curentul de dezechilibru scade sensibil și capătă valori inferioare valorii maxime $I_{dez\,max}$ din relația menționată. Temporizarea respectivă nu conduce la pericole pentru

generator, deoarece în acest interval scurt arcul din locul punerii la pămînt nu poate provoca deteriorări care să necesite desfacerea pachetului de tole pentru reparare.

O altă soluție pentru mărirea sensibilității constă în introducerea unui releu intermediar de blocaj, comandat de releele de curent ale protecției maximale împotriva scurtcircuitelor exterioare (releele *1* din fig. 8.1); uneori, această soluție este folosită simultan cu introducerea temporizării, ca în schema din figura 8.14.

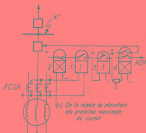


Fig. 8.14. Schema protecției generatoarelor împotriva punerilor la pămînt monofazate în stator, realizată cu *FCSH*.

Releul de curent *1* este alimentat de *FCSH* și comandă releul de timp *3*, care asigură temporizarea menționată, iar releul intermediar de ieșire *4* comandă declanșarea întrerupătorului și *ADR*. Contactul releului *1* este legat la polul pozitiv al bateriei de acumulatoare prin intermediul contactului normal închis al releului de blocaj *2*, care acționează — și își deschide contactul — numai cînd acționează releele de curent *1* ale protecției maximale din figura 8.1, deci cînd curentul atinge valoarea I_{pp1} din relația (8.3). Aceasta înseamnă că, dacă curentul depășește (1,35 ... 1,45) I_n (cum se întîmplă la scurtcircuite exterioare, cînd apar și valorile maxime ale curentului de dezechilibru), atunci contactul releului *2* se deschide; ca urmare, chiar dacă releul *1* și-ar închide contactul sub acțiunea curentului de dezechilibru maxim — avînd deci un curent de pornire mai mic decît cel definit de relația (8.32) — nu se transmite nici o comandă releului *3* și nu are loc declanșarea întrerupătorului.

Dacă generatorul protejat are neutrul legat la pămînt printr-o rezistență, atunci în serie cu această rezistență se introduce un transformator de curent, care se conectează cu *FCSH* într-o schemă de tip diferențial, releul de curent fiind legat în derivație cu circuitul astfel format. Prin această măsură se asigură selectivitatea funcționării protecțiilor în cazul apariției unei puneri la pămînt într-un generator funcționînd în paralel cu alte generatoare racordate la aceleași bare colectoare.

3. Scheme de protecție cu TSH

Deși curenții de dezechilibru sînt mai mici în cazul folosirii *TSH*, cele două metode de mărire a sensibilității expuse în paragraful anterior (releu de blocaj și introducerea unei mici temporizări) sînt utilizate și în schemele de protecție cu *TSH*; în cazul folosirii simultane a ambelor metode, schemele cu *TSH* (fig. 8.15) nu se deosebesc de cele cu *FCSH* decît prin înlocuirea dispozitivului de obținere a componentei homopolare.

În figura 8.15, *a* este reprezentat un generator legat la barele colectoare prin conductoare neizolate, iar în figura 8.15, *b*, un generator legat la bare prin intermediul unui cablu. În a doua variantă, cutia terminală a cablului este izolată de construcție și este legată la pămînt printr-un conductor care trece prin interiorul miezului *TSH*. Prin această măsură este eliminată posibilitatea unor acționări greșite ale protecției în cazul unor puneri la pămînt

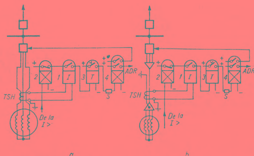


Fig. 8.15. Scheme ale protecției generatoarelor împotriva punerilor la pămînt în stator, realizate cu *TSH*:

a — pentru generatoare legate la barele colectoare prin conductoare neizolate; *b* — pentru generatoare legate la bare prin cablu.

exterioare, însoțite de circulația unor curenți vagabonzi (componente de secvență homopolară) prin pămînt și prin mantaua cablului, deci prin interiorul miezului *TSH*; datorită adoptării soluției din figura 8.15, *b*, circulația curenților vagabonzi prin interiorul miezului se face în sensuri opuse, prin manta și prin legătura la pămînt, efectul total este astfel nul și acționarea greșită a protecției nu poate avea loc.

La generatoarele de putere mare, legate la bare prin conductoare neizolate sau printr-un număr relativ mare de cabluri (uneori prin 10—15 cabluri), curenții de dezechilibru au valori importante și de aceea, pe lîngă măsurile expuse anterior pentru mărirea sensibilității, se adoptă măsuri suplimentare.

Astfel, miezul *TSH* este realizat din materiale speciale — de exemplu din permalloy — cu o porțiune cu pantă abruptă a curbei de magnetizare, cum este porțiunea *AB* din figura 8.16. Pentru a se asigura funcționarea miezului pe această porțiune (unde unei variații relativ mici ΔWI a numărului de amperspire îi corespunde o variație relativ importantă ΔB a inducției, deci o valoare sporită a tensiunii electromotoare induse în bobinajul secundar, ceea ce contribuie la mărirea curentului prin releu și deci la creșterea sensibilității protecției), pe miezul *TSH* se instalează o bobină de magnetizare suplimentară — notată în figura 8.17 cu w_{ms} — care deplasează domeniul de funcționare în porțiunea *AB*. Bobina de magnetizare suplimentară este alimentată în curent alternativ de la transformatorul de tensiune *TT*.

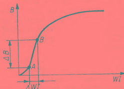


Fig. 8.16. Curba de magnetizare pentru miezul *TSH*.

Bobinajul secundar w_s este împărțit în două jumătăți, montate pe două laturi opuse ale miezului *TSH*; datorită acestui fapt se micșorează gradul de nesimetrie între bobinajul secundar și conductoarele care formează primarul, ceea ce asigură micșorarea curenților de dezechilibru.

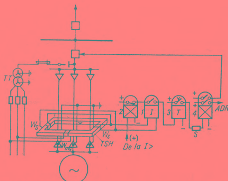


Fig. 8.17. Schema protecției generatoarelor împotriva punerilor la pămînt în stator realizată cu *TSH* cu magnetizare suplimentară.

Pentru ca curentul din bobina de magnetizare suplimentară w_{ms} să nu inducă tensiuni electromotoare parazite în bobinajul secundar — ceea ce ar determina creşterea curentului de dezechilibru — se folosesc *TSH* cu două miezuri; bobina w_{ms} se împarte în două jumătăți înfășurate în sensuri opuse pe cele două miezuri, iar bobinajul secundar se împarte în patru secțiuni egale (pentru acest caz, schema nu mai este reprezentată).

Releele *1*, *2*, *3* și *4* au aceleași funcțiuni ca și releele corespunzătoare din figura 8.15, iar cutiile terminale ale cablurilor sînt legate la pămînt, ca și în figura 8.15, *b*.

Dacă generatorul protejat are neutrul legat la pămînt printr-o rezistență, atunci conductorul din circuitul de legare la pămînt a neutrului este trecut prin interiorul miezului *TSH*, ceea ce asigură funcționarea selectivă în cazul unor puneri la pămînt exterioare, principiul fiind analog cu cel expus pentru explicarea modului de legare la pămînt a cutiei terminale a cablului din figura 8.15, *b*.

Protecțiile generatoarelor împotriva punerilor la pămînt în stator se pot realiza și în alte variante, de exemplu, cu amplificatoare magnetice sau cu relee direcționale, în ambele cazuri rezultînd o sensibilitate crescută.

F. PROTECȚII ROTORICE ALE GENERATOARELOR

1. Protecția împotriva primei puneri la pămînt în circuitul de excitație

Apariția unei puneri la pămînt în circuitul de excitație al generatorului nu prezintă un pericol imediat, întrucît prin punctul respectiv nu circulă curent de defect, deoarece curentul de excitație — fiind curent continuu — nu trece prin capacitatea bobinajului rotoric în raport cu pămîntul, deci nu există un circuit închis pentru un curent de defect.

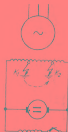


Fig. 8.18. Dubla punere la pămînt în rotor.

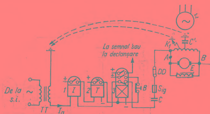


Fig. 8.19. Schema protecției împotriva primei puneri la pămînt în rotorul generatoarelor.

Existența unei puneri la pămînt în rotor, de exemplu în punctul K_1 din figura 8.18, se poate transforma însă într-un defect grav dacă apare ulterior și o a doua punere la pămînt, de exemplu în punctul K_2; în acest caz, o parte din bobinajul rotoric este scurtcircuitată prin pămînt, ceea ce determină două efecte periculoase.

• În primul rînd are loc o creștere importantă a curentului de excitație, întrucît rezistența circuitului rotoric scade, rezultînd încălziri și uzură inadmisibilă. •În al doilea rînd, cîmpul creat de rotor nu mai este uniform pe periferia acestuia și de aceea apare o forță radială, care tinde să smulgă generatorul din lagăre, dînd naștere unor vibrații puternice periculoase.

Rezultă astfel că este permisă continuarea funcționării generatorului după apariția primei puneri la pămînt în rotor, cu condiția ca în momentul acestei apariții — care trebuie semnalizată de o protecție specială — să fie conectată la generatorul respectiv o protecție împotriva dublei puneri la pămînt, care să comande declanșarea întrerupătorului la apariția celei de-a doua puneri la pămînt. În acest scop, toate generatoarele sînt prevăzute cu cîte o protecție împotriva primei puneri la pămînt rotorice, iar pentru grupuri de 1—5 generatoare — conform normativului — se prevede o protecție împotriva dublei puneri la pămînt.

În practică, deoarece la unele generatoare realizarea unei protecții sigure împotriva dublei puneri la pămînt întîmpină dificultăți, se prevede ca protecția împotriva primei puneri la pămînt să comande direct declanșarea întrerupătorului și deci oprirea generatorului.

Protecția împotriva primei puneri la pămînt se realizează cu ajutorul unei surse suplimentare de curent alternativ sau continuu. În figura 8.19 este redată varianta cu sursă de curent alternativ, reprezentată de transformatorul de tensiune *TT*, alimentat de la barele serviciilor interne și avînd tensiunea secundară de 40—100 V.

O bornă a bobinajului secundar al acestui transformator este legată la pămînt, iar cealaltă bornă este legată la circuitul format de bobina releului de curent *1*, contactul inferior (normal închis) al releului intermediar *3*, condensatorul *C*, siguranța *Sig*, dispozitivul de deconectare *DD* și bobinajul rotoric al generatorului. În absența unei puneri la pămînt în rotor, prin circuitul menționat circulă un curent alternativ I_a de valoare foarte redusă, deoarece circuitul respectiv se închide prin capacitatea *C'* a bobinajului rotoric față

de pămînt și reactanța capacitivă $X_{C'} = \frac{1}{\omega C'}$ a acesteia este foarte mare, întrucît valoarea capacității C' este foarte mică.

Curentul I_a avînd valori reduse, releul de curent *1* nu acționează și schema se găsește în repaus.

La apariția unei puneri la pămînt în rotor, de exemplu în punctul K_1, se scurtcircuitează capacitatea C' și din circuitul menționat anterior este eliminată reactanța importantă $X_{C'}$ ceea ce determină o scădere foarte mare a impedanței întregului circuit; ca urmare, curentul I_a crește foarte mult depășind curentul de pornire al releului *1* și acest releu acționează, comandînd acționarea releului de timp *2*. După trecerea temporizării releului *2*, necesară pentru a se evita acționarea protecției în cazul unor defecte trecătoare cu o durată scurtă de existență, are loc închiderea contactului și comanda acționării releului intermediar *3*, care își comută cele trei contacte.

Prin închiderea contactului superior se comandă semnalizarea sau declanșarea întrerupătorului. Prin închiderea contactului mijlociu se stabilește o legătură directă între borna pozitivă a bateriei de acumulatoare și borna de intrare a bobinei releului *3*, legătură care menține acest releu în stare de acționare, chiar dacă contactul releului *2* se deschide; operația realizată prin închiderea contactului mijlociu se numește *autoreținere* sau *autoblocare*. Revenirea releului *3* în starea de repaus este posibilă numai prin apăsarea pe butonul *B*, care întrerupe circuitul de autoreținere.

Prin deschiderea contactului inferior se întrerupe circuitul prin care circulă curentul I_a, în scopul micșorării duratei de circulație a acestui curent — de valoare mare — prin bobina releului *1*.

Condensatorul *C* este introdus în schemă pentru ca la apariția defectului în K_1 să nu existe posibilitatea ca prin circuitul curentului I_a să circule și o componentă continuă, determinată de faptul că acest circuit este alimentat și de excitatoarea *E*, fiind un circuit care se găsește în paralel cu porțiunea bobinajului rotoric dintre punctele *A* și K_1.

Siguranța *Sig* are rolul de a asigura întreruperea circuitului curentului I_a în cazul străpungerii condensatorului *C*, cînd curentul I_a crește sensibil, datorită micșorării impedanței circuitului, ca urmare a eliminării reactanței condensatorului *C*. Dispozitivul de deconectare *DD* este folosit în cazul verificării protecției.

La noi în țară se fabrică (la ICEMENERG) relee *RSPP* (releede simplă punere la pămînt), pentru protecția circuitului rotoric împotriva primei puneri la pămînt, funcționînd pe baza principiului descris mai înainte.

2. Protecția împotriva dublei puneri la pămînt în circuitul de excitație

În cazul generatoarelor la care protecția împotriva primei puneri la pămînt comandă o semnalizare, personalul de tură conectează la generatorul respectiv protecția împotriva dublei puneri la pămînt și generatorul rămîne în continuare în funcțiune.

Protecția împotriva dublei puneri la pămînt în rotor se realizează pe baza principiului punții cu patru brațe (fig. 8.20), releul de curent *1* fiind montat într-una dintre diagonale, iar cealaltă diagonală fiind alimentată de excitatoarea *E*. Două din brațele punții sînt formate de rezistențele R'_{ex} și R''_{ex} ale celor două porțiuni ale bobinajului de excitație, separate de punctul K_1 al

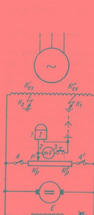


Fig. 8.20. Ilustrarea principiului de realizare a protecției împotriva dublei puneri la pămînt în rotor.

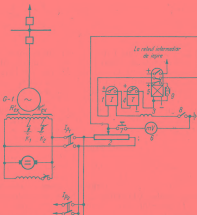


Fig. 8.21. Schema protecției împotriva dublei puneri la pămînt în rotorul generatoarelor.

primei puneri la pămînt, iar celelalte două brațe sînt formate de rezistențele R'_p și R''_p ale celor două porțiuni ale potențiometrului P, separate de cursor. Diagonala în care este montat releul *1* se închide prin pămînt. În paralel cu bobina releului poate fi introdus milivoltmetrul *2* prin apăsare pe butonul *3*.

Conectarea potențiometrului P se efectuează — prin închiderea întrerupătoarelor cu pîrghie *4* și *4'* — după ce protecția împotriva primei puneri la pămînt semnalizează apariția defectului în punctul K_1. Pentru echilibrarea punții formate se apasă pe butonul *3* și se deplasează cursorul potențiometrului pînă cînd milivoltmetrul *2* indică zero; în această situație, puntea este echilibrată avînd loc relația:

$$R'_{ex} R''_p = R''_{ex} R'_p. \tag{8.36}$$

Generatorul rămîne în funcțiune, iar curentul prin releu este nul, deci releul se găsește în stare de repaus. Dacă ulterior apare o a doua punere la pămînt rotorică, de exemplu în punctul K_2, o parte din rezistența R'_{ex} este scurtcircuitată prin pămînt și aceasta capătă o valoare diferită de cea anterioară, ceea ce determină dezechilibrarea punții, deoarece relația (8.36) nu mai este satisfăcută. Ca urmare, prin diagonala în care se găsește bobina releului *1* circulă un curent care provoacă acționarea acestui releu.

Schema completă a protecției este reprezentată în figura 8.21. Potențiometrul *2* poate fi conectat în paralel cu circuitul rotoric al diferitelor generatoare din centrală prin conectarea unuia dintre întrerupătoarele cu pîrghie Ip_1, Ip_2 etc.; în acest mod, protecția este conectată la generatorul la care a fost semnalizată apariția primei puneri la pămînt (în cazul din figura 8.21, generatorul *G-1*).

Pentru ca releul *1* să nu acționeze greșit în timpul echilibrării punții (cînd butonul *7* este închis și cursorul potențiometrului *2* este deplasat pînă cînd milivoltmetrul *6* arată zero) este necesar ca în intervalul respectiv întrerupătorul cu pîrghie *8* să fie deschis, releul *1* fiind astfel scos din diagonala punții.

Dacă ulterior apare o a doua punere la pămînt, puntea se dezechilibrează și releul *1* acționează, comandînd releul de timp *4*, care are o temporizare de 1—1,5 s. După trecerea acestei temporizări, introdusă pentru ca protecția să nu acționeze dacă a doua punere la pămînt este temporară, contactul releului *4* se închide și comandă acționarea releului intermediar *5*, care își comută cele trei contacte.

Închiderea contactului superior comandă declanșarea întrerupătorului și *ADR* (comandînd acționarea releului intermediar de ieșire comun pentru toate protecțiile generatorului), prin închiderea contactului inferior are loc autoreținerea releului *5*, iar prin deschiderea contactului mijlociu se întrerupe curentul prin bobina releului *1*.

În acest mod, se limitează durata circulației curentului prin bobina releului *1*, micșorînd uzura acestui releu, iar transmiterea sigură a comenzii de declanșare este asigurată de autoreținerea releului *5*. După declanșarea întrerupătorului, revenirea releului *5* în stare de repaus este obținută prin apăsare pe butonul *9*.

În schemă mai apare bobina *3*, care are rolul de a împiedica acționări greșite ale protecției sub acțiunea unei componente de curent alternativ, care poate circula prin diagonala punții — și deci prin bobina releului *1* — înainte de apariția celei de-a doua puneri la pămînt, cînd puntea este echilibrată și condiția (8.36) este îndeplinită; componenta alternativă poate apărea din cauza unei neuniformități a întrefierului excitatoarei.

Bobina *3* are o rezistență foarte mică în curent continuu, dar are o reactanță inductivă importantă X_L pentru componenta alternativă (deoarece $X_L = L\omega$), determinînd astfel micșorarea componentei alternative.

Pentru releul *1* se alege curentul de pornire:

$$I_{pr1} = 0{,}05 \ldots 0{,}1 \text{ A}.$$

La ICEMENERG se fabrică relee *RDPP* (relee împotriva dublei puneri la pămînt), realizate conform schemei din figura 8.21.

G. PROTECȚIA GENERATOARELOR ÎMPOTRIVA CREȘTERII TENSIUNII

În urma unei scăderi bruște a sarcinii, generatoarele (îndeosebi hidrogeneratoarele, datorită construcției lor) se pot accelera mult, rezultînd creșteri periculoase ale tensiunii la borne. Pentru ca tensiunea să nu depășească anumite limite admisibile, generatoarele sînt prevăzute cu protecții împotriva creșterii tensiunii.

Schema unei asemenea protecții este reprezentată în figura 8.22. Releul maximal de tensiune *1* comandă releul de timp *2* cu o temporizare de 0,5 s (introdusă pentru a împiedica acționarea protecției la creșteri de scurtă durată ale tensiunii), iar închiderea contactului acestui releu determină acționarea releului intermediar de ieșire *3*, deci declanșarea întrerupătorului și acționarea *ADR*.

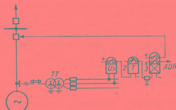


Fig. 8.22. Schema protecției hidrogeneratoarelor împotriva creșterii tensiunii.

Tensiunea de pornire U_{pp1} a protecției realizată cu releul *1*, alimentat de transformatorul de tensiune *TT*, se alege conform relației:

$$U_{pp1} = 1{,}5\, U_n,$$

în care U_n este tensiunea nominală a generatorului.

La ICEMENERG a fost realizat releul maximal de tensiune *RTG*, destinat protecției generatoarelor împotriva creșterii tensiunii.

H. SCHEMA DE ANSAMBLU A PROTECȚIILOR UNUI GENERATOR RACORDAT LA BARE COLECTOARE

Schema cu protecțiile unui turbogenerator de putere mai mare de 3 MW, avînd cîte o singură înfășurare pe fază, este reprezentată în figura 8.23.

Releele *1*, *3*, *4* și *5* formează protecția maximală de curent împotriva scurtcircuitelor exterioare, releele *2* și *6* alcătuiesc protecția maximală de curent împotriva suprasarcinilor, protecția diferențială longitudinală este realizată cu releele *7* și *8*, iar releele *9*, *10* și *11* — împreună cu *TSH* cu magnetizare suplimentară — formează protecția împotriva punerilor la pămînt monofazate. Releul intermediar *9* îndeplinește (prin deschiderea contactului inferior) rolul releului de blocaj *2* din figurile 8.15 și 8.17; contactul superior, care se închide cînd releul 9 acționează, scurtcircuitează bobina releului de curent *10* pentru micșorarea uzurii acestui releu; astfel este împiedicată circulația unui curent de dezechilibru important prin bobina releului *10* (curent care apare la scurtcircuite exterioare) pe durata temporizării cu care protecția maximală de curent lichidează scurtcircuitele apărute în instalații exterioare generatorului.

Transformatorul de tensiune *TT* este prevăzut și cu un bobinaj secundar în triunghi deschis, la bornele căruia se obține suma fazorială a tensiunilor secundare de pe fiecare fază, deci se obține o tensiune proporțională cu componenta de secvență homopolară $\underline{U}_0$ a tensiunii, deoarece între componenta $\underline{U}_0$ și tensiunile celor trei faze există o relație analoagă cu relația (8.27):

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_R + \underline{U}_S + \underline{U}_T}{3}. \tag{8.37}$$

Voltmetrul *12*, care se introduce în circuit prin apăsare pe butonul *13*, indică deci o tensiune proporțională cu componenta U_0 și, prin urmare, poate fi folosit la controlul stării izolației.

Releele *14*, *15* și *16* formează protecția împotriva primei puneri la pămînt în rotor.

Toate protecțiile statorice comandă releul intermediar de ieșire *17* prin releele de semnalizare *S*. Dispozitivele de deconectare *DD* permit întreruperea legăturilor dintre diferitele protecții și releul *17* atunci cînd se efectuează încercarea protecțiilor.

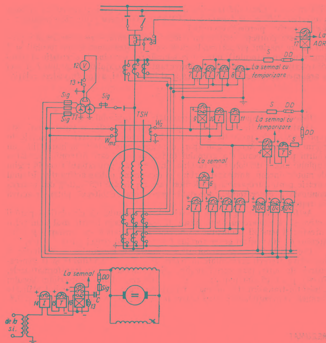


Fig. 8.23. Schema ansamblului protecțiilor unui turbogenerator de putere mai mare de 5 MW: *1, 2, 3, 4, 5, 6* — protecția maximală de curent; *7, 8* — protecția diferențială longitudinală; *9, 10, 11* — protecția împotriva punerilor la pămînt monofazate în stator; *12* — voltmetru pentru controlul stării izolației, alimentat de bobinajul în triunghi deschis al transformatorului de tensiune *TT*; *13* — buton; *14, 15, 16* — protecția împotriva primei puneri la pămînt în rotor; *17* — releu intermediar de ieșire; *C* — condensator; *Sig* — siguranță; *DD* — dispozitiv de deconectare; *S* — releu-clapetă de semnalizare.

Pentru generatoarele de puteri mari (100 MW și mai mult) se recomandă și alte protecții, care nu sînt figurate în schema din figura 8.23.

Una dintre aceste protecții este reprezentată de protecția împotriva reducerii accidentale a curentului de excitație al generatorului. În cazul unei asemenea reduceri (provocată, de exemplu, de o întrerupere a circuitului rotoric al generatorului, cînd curentul de excitație se anulează), are loc scăderea importantă a valorii t.e.m. indusă în bobinajele statorice și generatorul trece în regim asincron, cu viteză mai mare decît cea de sincronism. Ca urmare, apar supraîncălziri în stator și pierderi suplimentare în rotor.

De asemenea, în cazul pierderii excitației generatorul consumă din rețea o anumită putere reactivă, în timp ce în regim normal debitează putere reac-

tivă în rețea. Controlul sensului de circulație al puterii reactive stă la baza protecției *RPEx*, elaborată la ICEMENERG pentru protecția generatoarelor împotriva pierderii excitației.

Această protecție conține un releu de impedanță, care controlează raportul dintre mărimi proporționale cu fazorii $\underline{U}$ (tensiunea generatorului) și $\underline{I}$ (curentul generatorului), întrucît la schimbarea sensului de circulație al puterii reactive are loc o modificare importantă a defazajului curentului $\underline{I}$ și deci a argumentului vectorului complex $\underline{Z}$ al impedanței, avînd în vedere relația:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}}.$$

Releele de impedanță sînt prezentate în capitolul 14.

O altă protecție recomandată pentru generatoarele de puteri mari este reprezentată de protecția generatoarelor împotriva trecerii accidentale în regim de motor. Acest regim apare din cauza unor defecte în instalațiile din cadrul părții mecanice a grupului turbogenerator, care determină anularea cuplului motor dezvoltat de turbină. În acest caz, generatorul trece în regim de motor sincron, antrenînd turbina și consumînd putere activă din sistemul electric pentru acoperirea pierderilor, care reprezintă 0,5%...6% din puterea nominală a generatorului; totodată, generatorul debitează putere reactivă în rețea.

Astfel, în acest regim are loc schimbarea sensului de circulație a puterii active și ca urmare protecția poate fi realizată prin intermediul unui releu direcțional sensibil, alimentat cu mărimi proporționale cu tensiunea generatorului $\underline{U}$ și curentul generatorului $\underline{I}$ și controlînd sensul puterii active.

Protecțiile împotriva reducerii accidentale a curentului de excitație și împotriva trecerii accidentale în regim de motor sînt utilizate și la generatoarele de puteri mari care funcționează în schemă bloc cu transformatoarele. Aceste protecții sînt indicate pe schema de ansamblu a protecțiilor blocului generator-transformator de mare putere din figura 10.5, în care sînt utilizate semnele convenționale pentru schemele de amplasare din tabelele 7.3 și 7.4.

REZUMAT

● Generatoarele sînt prevăzute cu protecții împotriva defectelor în stator (scurtcircuite între faze, scurtcircuite între spirele aceleiași faze, puneri la pămînt monofazate), împotriva defectelor în rotor (simpla punere la pămînt, dubla punere la pămînt, reducerea accidentală a curentului de excitație) și împotriva regimurilor anormale (supraintensități provocate de scurtcircuite exterioare sau de suprasarcini, creșteri ale tensiunii la hidrogeneratoare, trecerea în regim de motor).

● Generatoarele de puteri cuprinse între 3 și 50 MW sînt prevăzute (împotriva scurtcircuitelor exterioare și a suprasarcinilor) cu o protecție maximală de curent temporizată, cu un blocaj de tensiune minimă, iar generatoarele de puteri mai mari decît 50 MW sînt prevăzute (împotriva acelorași defecte) cu o protecție maximală de curent temporizată cu blocaj de tensiune minimă, realizată în varianta cu filtru de curent de secvență inversă. Generatoarele de puteri pînă la 3 MW inclusiv sînt prevăzute cu protecții maximale de curent în realizare simplificată, fără blocaj de tensiune minimă.

● Protecţia de bază a generatoarelor (cu puteri egale sau mai mari decît 3 MW) împotriva scurtcircuitelor între fazele statorului este protecţia diferenţială longitudinală, realizată prin conectarea releelor de curent în paralel cu circuitele diferenţiale, formate cu ajutorul transformatoarelor de curent montate la capetele zonei protejate.

● Pentru mărirea sensibilităţii protecţiei diferenţiale se folosesc transformatoare cu saturaţie rapidă (*TSR*) sau relee cu bobine de frînare. Folosirea *TSR* se bazează pe faptul că acestea transformă numai în slabă măsură componenta aperiodică importantă a curentului de dezechilibru.

● În locul protecţiei diferenţiale, la generatoarele de puteri mai mici de 3 MW se foloseşte secţionarea de curent împotriva scurtcircuitelor între fazele statorului.

● Protecţiile împotriva scurtcircuitelor între spirele aceleiaşi faze se realizează ca protecţii diferenţiale transversale cu şase transformatoare de curent sau ca protecţii cu un singur transformator de curent, montat pe legătura dintre cele două puncte neutre formate cu cîte trei din cele şase înfăşurări statorice (cîte două pe fiecare fază).

● Întrucît punerile la pămînt monofazate în stator sînt însoţite de apariţia componentei de secvenţă homopolară, protecţiile împotriva acestor defecte se realizează ca protecţii homopolare, cu filtre de curent de secvenţă homopolară *(FCSH)* sau cu transformatoare de secvenţă homopolară *(TSH)*.

● Protecţia împotriva simplei puneri la pămînt în rotor se realizează cu ajutorul unei surse suplimentare de curent alternativ sau continuu şi a unui releu de curent care controlează valoarea curentului debitat de această sursă prin circuitul rotoric, iar protecţia împotriva dublei puneri la pămînt în rotor se realizează prin formarea unei punţi cu patru braţe, într-una din diagonalele punţii fiind montat un releu de curent.

VERIFICAREA CUNOŞTINŢELOR

1. Care performanţă a protecţiei maximale de curent se îmbunătăţeşte prin introducerea filtrului de curent de secevenţă inversă *FCSI*?
   a) selectivitatea?
   b) sensibilitatea?
   c) siguranţa?
2. Care este principala dificultate în realizarea protecţiilor diferenţiale?
   a) numărul mare al transformatoarelor de curent?
   b) realizarea circuitului diferenţial?
   c) combaterea efectelor curentului de dezechilibru?
3. Pe ce se bazează folosirea *TSR* pentru combaterea efectelor curentului de dezechilibru?
   a) pe transformarea numai în slabă măsură a componentei aperiodice a curentului de dezechilibru?
   b) pe conţinutul în armonice superioare al curentului de dezechilibru?
   c) pe variaţia în timp a amplitudinii componentelor alternative ale curentului de dezechilibru?

4. Care performanţă a protecţiei diferenţiale longitudinale se îmbunătăţeşte simţitor prin folosirea *TSR* sau a releelor cu bobine de frînare?
   a) rapiditatea?
   b) selectivitatea?
   c) sensibilitatea?
5. Ce categorie de protecţii se prevăd împotriva punerilor la pămînt monofazate în stator?
   a) protecţii diferenţiale?
   b) protecţii cu filtre de secvenţă inversă?
   c) protecţii homopolare?
6. Cum se realizează protecţia împotriva simplei puneri la pămînt rotorice?
   a) prin injectarea în circuitul rotoric a unui curent continuu sau alternativ de la o sursă suplimentară?
   b) prin intermediul unei scheme în punte?
   c) prin intermediul unor filtre?
7. Pe ce principiu se bazează protecţia împotriva dublei puneri la pămînt rotorice?
   a) pe creşterea curentului rotoric?
   b) pe controlul unei tensiuni?
   c) pe dezechilibrarea unei punţi cu patru braţe?

CAPITOLUL 9

PROTECŢIA TRANSFORMATOARELOR ŞI A AUTOTRANSFORMATOARELOR

A. NOŢIUNI GENERALE

Transformatoarele şi autotransformatoarele sînt în număr mai mare decît generatoarele sincrone, sînt mai ieftine şi au o funcţionare mai simplă, deci o avariabilitate mai redusă decît a generatoarelor. În consecinţă, protecţia prin relee a transformatoarelor şi a autotransformatoarelor este relativ mai simplă, în comparaţie cu aceea a generatoarelor sincrone.

Transformatoarele se prevăd cu protecţii prin relee împotriva defectelor interne şi împotriva regimurilor anormale de funcţionare.

● **Defectele interne** ale unui transformator sînt:

— *scurtcircuitele polifazate*;

— *defectele la pămînt monofazate* (care în reţelele electrice cu tensiunea nominală $U_n \geq 110$ kV sau în reţelele de joasă tensiune reprezintă scurtcircuite monofazate);

— *scurtcircuitele între spire*.

Defectele interne ale transformatorului sînt considerate cele care se produc fie în cuva transformatorului, fie pe conductoarele de legătură dintre bornele transformatorului şi întrerupătoarele lui.

● **Regimurile anormale de funcţionare**, periculoase pentru transformator, sînt:

— *supraintensităţile provocate de scurtcircuite exterioare;*

— *supraintensităţile provocate de suprasarcini;*

— *scăderea nivelului de ulei în cuva transformatorului* (la temperaturi foarte coborîte sau la fisurarea cuvei).

Prin zona protejată l_{pr} în cazul protecţiei prin relee a unui transformator se înţelege zona cuprinsă între întrerupătoarele prin care transformatorul este legat la reţeaua electrică, inclusiv conductoarele de legătură spre aceste întrerupătoare (fig. 9.1).

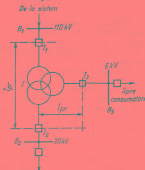


Fig. 9.1. Zona protejată în cazul protecţiei prin relee a unui transformator.

Această delimitare poate fi stabilită în ipoteza (valabilă în marea majoritate a cazurilor din practică) că transformatoarele de curent ale protecţiei sînt instalate în imediata apropiere a întrerupătoarelor; definirea riguroasă a zonei

protejate stabilește delimitarea acestei zone prin intermediul punctelor de amplasare a transformatoarelor de curent. De aceea, în cazul în care transformatoarele de curent nu sînt instalate lîngă întrerupător, trebuie să se considere că zona protejată începe din punctul de instalare al acestor transformatoare de curent.

Observația de mai sus este valabilă și pentru protecțiile altor instalații electroenergetice, nu numai pentru protecțiile transformatoarelor.

B. PROTECȚII PREVĂZUTE ÎN NORMATIV PENTRU TRANSFORMATOARE ȘI AUTOTRANSFORMATOARE

În funcție de puterea transformatoarelor și a autotransformatoarelor și de tensiunea superioară la care sînt racordate, normativul prevede unele dintre următoarele tipuri de protecții:

— protecția de distanță sau protecția maximală de curent, împotriva supraintensităților provocate de scurtcircuite exterioare;

— protecția maximală de curent împotriva supraintensităților provocate de suprasarcini;

— protecția diferențială longitudinală, protecția de cuvă sau secționarea de curent, împotriva scurtcircuitelor în interiorul zonei protejate;

— protecția cu relee de gaze împotriva defectelor în cuvă și a scăderii nivelului de ulei;

— protecția împotriva scurtcircuitelor monofazate.

Întrucît protecțiile de distanță formează obiectul capitolului 14, în continuare sînt prezentate celelalte protecții prevăzute pentru transformatoare și autotransformatoare.

C. PROTECȚIA MAXIMALĂ DE CURENT ÎMPOTRIVA SCURTCIRCUITELOR EXTERIOARE ȘI A SUPRASARCINILOR

Protecția maximală de curent a transformatoarelor se prevede împotriva supraintensităților provocate de scurtcircuite exterioare și de suprasarcini. Această protecție se realizează ca și la generatoare cu relee maximale de curent și este temporizată; în unele cazuri este folosit și blocajul de tensiune minimă.

Pentru ca protecția maximală de curent să constituie totodată o protecție de rezervă împotriva defectelor interne în transformator, transformatoarele de curent și releele acestei protecții se instalează pe partea alimentării transformatorului protejat (fig. 9.2). În cazul unui scurtcircuit în transformator (de exemplu, în K), transformatorul de curent TC este parcurs de curentul de scurtcircuit I_{sc}. Dacă protecția de bază a transformatorului T (diferențială longitudinală sau secționare de curent) nu comandă declanșarea întrerupătoarelor I_1 și I_2, acționează protecția maximală de curent care transmite, cu o anumită temporizare, impulsul de declanșare la cele două întrerupătoare.

Dacă transformatorul protejat este racordat pe ambele tensiuni la surse de alimentare (fig. 9.3), transformatoarele de curent și releele se montează pe partea alimentării principale, adică pe partea surselor cu o putere globală mai mare, care au un aport mai însemnat în cazul unui scurtcircuit în punctul K,

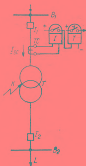


Fig. 9.2. Schema monofilară a protecției maximale de curent temporizată împotriva scurtcircuitelor exterioare și a suprasarcinilor.



Fig. 9.3. Schema monofilară a unui transformator racordat pe ambele tensiuni la surse de alimentare.

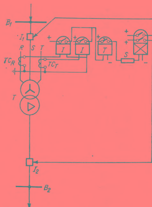


Fig. 9.4. Schema protecției maximale de curent realizată pe două faze.

în interiorul transformatorului. Astfel se asigură o sensibilitate mai mare a protecției la defecte în transformator, cînd protecția maximală de curent temporizată poate acționa ca protecție de rezervă.

Protecția maximală de curent a transformatoarelor coborîtoare de tensiune, racordate pe ambele tensiuni la rețele cu curenți mici de punere la pămînt, se poate realiza numai pe două faze (fig. 9.4), cu două relee și două transformatoare de curent.

Această schemă prezintă dezavantajul unei sensibilități reduse la scurtcircuite bifazate după conexiunea λ/Δ a transformatorului protejat. Astfel, pentru anumite scurtcircuite exterioare bifazate (de exemplu, în *K*, fig. 9.5), curentul prin faza *S*, fără transformator de curent, este de două ori mai mare decît curenții prin fazele cu transformatoare și relee de curent.

Din această cauză, coeficientul de sensibilitate al protecției maximale de curent determinat prin relația:

$$k_{sens} = \frac{I_{sc\ min}}{I_{pp}}, \tag{9.1}$$

este de două ori mai mic decît cel pentru un releu alimentat de la un reductor montat pe faza *S*.

Utilizînd schema cu două transformatoare și trei relee de curent (fig. 9.6), curentul de defect sesizat de protecție se dublează (deci se dublează și coeficientul k_{sens}). În acest caz, deși nu s-a montat un transformator de curent pe faza *S*,

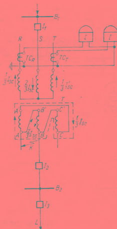


Fig. 9.5. Schema protecției maximale de curent realizată pe două faze pentru un transformator cu conexiunea λ/Δ.

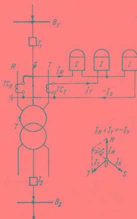


Fig. 9.6. Schema cu două transformatoare și trei relee de curent.

prin bobina celui de-al treilea releu de curent circulă un curent egal cu $-\underline{I}_S$, întrucît

$$\underline{I}_R + \underline{I}_T = -\underline{I}_S, \tag{9.2}$$

conform diagramei fazoriale din figura 9.6.

Se definește un *coeficient de schemă* K_{sch} ca fiind raportul dintre curentul prin releu și curentul din secundarul transformatorului de curent care alimentează releul:

$$K_{sch} = \frac{I_r}{I_{sTC}}. \tag{9.3}$$

În cazul conexiunii în triunghi a transformatoarelor de curent:

$$K_{sch} = \sqrt{3},$$

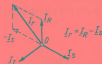


Fig. 9.7. Diagrama fazorială a curenților pentru cazul conectării în triunghi a transformatoarelor de curent.

deoarece prin releu circulă un curent I_r egal cu diferența fazorială a doi curenți secundari, de exemplu (pentru unul dintre relee):

$$\underline{I}_r = \underline{I}_R - \underline{I}_S,$$

iar din diagrama fazorială din figura 9.7 rezultă valoarea menționată pentru coeficientul de schemă.

Pentru conexiunea în stea a transformatoarelor de curent rezultă $K_{sch} = 1$ (curentul prin bobina releului este cel din secundarul transformatorului de curent).

Curentul de pornire I_{pp} al protecției maximale de curent a transformatorului se calculează în alt mod decît la generatoare, cu relația:

$$I_{pp} = \frac{K_{sig}}{K_{rev}} I_{sarc\ max}, \qquad (9.4)$$

în care $I_{sarc\ max}$ este curentul maxim de sarcină care poate circula prin transformatorul protejat.

Curentul $I_{sarc\ max}$ poate apărea în două cazuri: sau la autopornirea motoarelor electrice alimentate de transformatorul protejat, sau la ieșirea din funcțiune a unui transformator care lucrează în paralel cu transformatorul protejat.

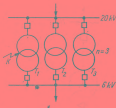


Fig. 9.8. Schema cu trei transformatoare în paralel.

În timpul autopornirii motoarelor electrice, după restabilirea alimentării, curenții cresc foarte mult, deoarece motoarele pornesc în sarcină și se accelerează simultan (de la o valoare redusă a turației la valoarea nominală).

Curentul de sarcină maximă datorat autopornirii motoarelor electrice, alimentate de transformatorul protejat, se calculează cu relația:

$$I_{sarc\ max} = K_{ap} I_n, \qquad (9.5)$$

în care:

K_{ap} este coeficientul de autopornire, cu o valoare în general egală cu 3;
I_n — curentul nominal al transformatorului.

Cînd sînt n transformatoare care funcționează în paralel (fig. 9.8), curentul de sarcină maximă prin transformatorul protejat, la defectarea unui alt transformator, are valoarea:

$$I_{sarc\ max} = \frac{n}{n-1} I_n, \qquad (9.6)$$

deoarece sarcina care revenea transformatorului defect se repartizează uniform, la ieșirea din funcțiune a acestuia, între celelalte transformatoare.

La calculul curentului de pornire al protecției maximale de curent a transformatorului protejat, pentru valoarea $I_{sarc\ max}$ se adoptă cea mai mare din valorile obținute cu relațiile (9.5) și 9.6).

Curentul de pornire al releului are valoarea:

$$I_{pr} = K_{sch} \frac{I_{pp}}{n_{TC}}, \qquad (9.7)$$

unde n_{TC} este raportul de transformare al transformatorului de curent care alimentează bobina releului.

Protecția maximală de curent trebuie să asigure pentru coeficientul de sensibilitate condiția:

$$K_{sens} \geqslant 1{,}5.$$

Dacă această condiție nu este îndeplinită, protecția se completează cu un blocaj de tensiune minimă, schema acestuia fiind ilustrată în figura 9.9.

Prin completarea schemei protecției maximale de curent cu blocajul de tensiune minimă, în calculul curentului de pornire al protecției maximale nu mai intervine $I_{sarc\ max}$ (v. relația 9.4), ci poate fi considerată, ca și la

Fig. 9.9. Schema blocajului de tensiune minimă.

protecția generatorului, valoarea nominală I_n a curentului prin transformatorul protejat:

$$I_{pp} = \frac{K_{sig}}{K_{rev}} I_n. \tag{9.8}$$

Deoarece $I_n \ll I_{sarc\ max}$, rezultă o reducere însemnată a valorii curentului de pornire al protecției, și deci o creștere simțitoare a coeficientului de sensibilitate.

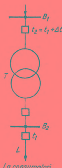
Pentru a se asigura selectivitatea funcționării protecției, temporizarea releului de timp al protecției maximale de curent se alege, ca și în cazul protecției generatorului, cu o treaptă de timp Δt mai mare decît temporizarea protecției maximale a elementului imediat următor spre consumatori (de exemplu, a liniei L — fig. 9.10).

Protecția împotriva suprasarcinilor se realizează, ca și la generatoare, cu un releu de curent suplimentar și cu un releu de timp.

D. PROTECȚIA MAXIMALĂ DE CURENT A TRANSFORMATOARELOR CU TREI BOBINAJE

În figura 9.11 este reprezentată schema monofilară a unui astfel de transformator.

Protecția maximală de curent a transformatorului T trebuie realizată astfel încît în cazul unui scurtcircuit exterior (de exemplu în punctul K, pe linia L) care nu este lichidat de protecția liniei, să nu comande declanșarea tuturor celor trei întrerupătoare, ci numai declanșarea întrerupătorului I_3 de pe partea de 20 kV. În acest mod transformatorul rămîne în funcțiune pe tensiunile de 110 și 6 kV, alimentînd consumatorii de pe barele de 6 kV cu energia electrică primită din rețeaua de 110 kV.



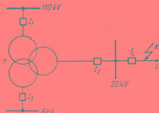


Fig. 9.11. Schema monofilară a unui transformator cu trei bobinaje.

Fig. 9.10. Alegerea temporizării la protecția maximală de curent.

În mod similar, la un defect exterior pe o linie care pleacă de pe barele de 6 kV (și care nu este lichidat de protecția acestei linii), protecția maximală de curent a transformatorului T trebuie să comande — cu temporizare — declanșarea întrerupătorului I_3 de pe partea de 6 kV, transformatorul rămînînd în funcțiune pe tensiunile de 110 și 20 kV.

Rezultă astfel că la transformatoarele cu trei bobinaje protecția maximală de curent trebuie instalată pe mai multe tensiuni.

1. Transformatoare cu alimentare unilaterală

Schema monofilară a protecției maximale de curent pentru transformatoarele cu trei bobinaje, alimentate dintr-o singură direcție, este reprezentată (pentru o singură fază) în figura 9.12. După cum se vede, se instalează protecții maximale de curent temporizate pe partea fiecăruia dintre cele trei bobinaje, pentru ca în cazul unui scurtcircuit exterior, la una dintre cele trei tensiuni să declanșeze numai întrerupătorul aferent barelor cu această tensiune, transformatorul rămînînd în funcțiune cu celelalte două bobinaje.

Pentru asigurarea selectivității, temporizările releelor de timp *5* și *6*, t_{a5} și t_{a6}, se aleg cu o treaptă de timp mai mare decît temporizările protecțiilor elementelor imediat următoare — de la sursă spre consumatori.

Astfel:

$$t_{a5} = t_{a\,max\,linii\,20\,kV} + \Delta t \tag{9.9}$$

și

$$t_{a6} = t_{a\,max\,linii\,6\,kV} + \Delta t. \tag{9.10}$$

Releul de timp *4* al protecției maximale de curent de pe partea de 110 kV comandă declanșarea tuturor întrerupătoarelor transformatorului, fiind conectat la releul de curent *1*, montat pe partea alimentării. Deoarece $t_{a5} > t_{a6}$, pentru releul de timp *4* se adoptă o temporizare superioară valorii t_{a5}:

$$t_{a4} = t_{a5} + \Delta t. \tag{9.11}$$

La un defect exterior transformatorului protejat, în K_1 (deci în rețeaua de 6 kV), care nu este lichidat selectiv de protecția liniei, demarează releele

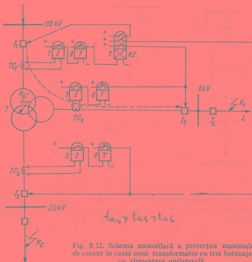


Fig. 9.12. Schema monofilară a protecției maximale de curent în cazul unui transformator cu trei bobinaje, cu alimentare unilaterală.

de curent *1* și *3*, parcurse de curentul de defect (în fig. 9.12 s-a reprezentat printr-o linie întreruptă sensul de circulație al curentului la un defect în K_1).

Însă, deoarece $t_{a6} < t_{a4}$ acționează selectiv protecția maximală de pe partea de 6 kV (releul de curent *3* și releul de timp *6*), comandînd numai declanșarea întrerupătorului I_3, aferent tensiunii la care s-a produs defectul.

În mod asemănător, la un defect în K_2, pe partea de 20 kV, acționează releele de curent *1* și *2*; deoarece $t_{a5} < t_{a4}$, comanda de declanșare se transmite numai la I_2. După deconectarea transformatorului de la bara defectă, curentul prin releul *1* scade la valoarea nominală și astfel este oprită acționarea protecției maximale de pe partea de 110 kV.

Protecția maximală de curent de pe partea de 110 kV se prevede și ca protecție de rezervă împotriva defectelor interne în transformator. Astfel, la un defect intern, în K_3, dacă protecția de bază, rapidă, a transformatorului nu acționează, ceea ce face ca defectul să persiste, acționează releele *1* și *4*, comandînd prin releul intermediar *7* declanșarea tuturor întrerupătoarelor transformatorului protejat.

Valorile de pornire ale protecțiilor maximale de curent se stabilesc în funcție de curentul de sarcină maximă prin bobinajul respectiv al transformatorului protejat.

Pentru partea de 6 kV și cea de 20 kV, unde curenții de punere la pămînt au valori mici, protecția maximală de curent poate fi prevăzută numai pe două faze.

Ca și la transformatoarele cu două bobinaje, la transformatoarele cu trei bobinaje se prevede, cînd este necesar, blocajul de tensiune minimă.

Cînd transformatorul cu trei bobinaje este legat pe două tensiuni la surse de alimentare, pentru asigurarea selectivității poate fi necesar ca în schema protecției maximale de curent să se introducă relee direcționale.

În figura 9.13 este reprezentată schema monofilară a unei protecții maximale de curent, în cazul unui transformator cu trei bobinaje, cu surse de alimentare pe partea de 110 kV și de 20 kV.

Schema se deosebește de cea din figura 9.12 prin releul direcțional *8* al protecției maximale de pe partea de 20 kV și releul de timp *7*.

Calculînd temporizările ca mai înainte, rezultă: $t_{a4} > t_{a5} > t_{a6}$. La un defect exterior pe partea de 6 kV, de exemplu în punctul K_1, protecția lucrează selectiv prin releele *3* și *6* și transformatorul rămîne în funcțiune la tensiunile de 110 și 20 kV. În cazul unui defect în K_2 pe partea de 20 kV, releele *3* nu acționează, nefiind parcurse de curentul de scurtcircuit; pornesc în schimb releele *1* și *2*, prin ale căror bobine circulă curentul de defect și, deoarece $t_{a5} < t_{a4}$, protecția maximală de pe partea de 20 kV comandă declanșarea selectivă a întrerupătorului I_2.

La un defect în K_3, pe partea de 110 kV, condiția de selectivitate cere ca releul *4* să comande declanșarea întrerupătorului I_1, iar transformatorul să rămînă în funcțiune pe părțile de 6 și 20 kV. Deoarece temporizarea releului de timp *5* este mai mică decît cea a releului *4* ($t_{a5} < t_{a4}$) ar însemna ca protecția maximală de pe partea de 20 kV să deconecteze transformatorul de la aceste bare mai înainte ca releul *4* să-și închidă contactele. De aceea, este necesară introducerea releului direcțional *8*, care își închide contactele numai la defecte exterioare pe partea de 20 kV, comandînd releul de timp *5*, și rămîne cu contactele deschise la defecte determinînd curenți de sens opus (sens

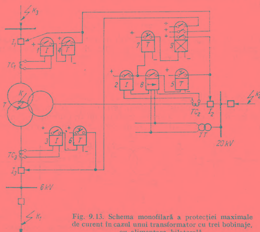


Fig. 9.13. Schema monofilară a protecției maximale de curent în cazul unui transformator cu trei bobinaje, cu alimentare bilaterală.

adoptat în mod convențional, întrucît se referă la un curent alternativ), cum sînt scurtcircuitele pe partea de 110 kV.

În acest caz, releele 2 și 5 nu mai pot acționa în cazul unui defect în transformatorul protejat. Pentru ca protecția maximală de curent de pe partea de 20 kV să reprezinte o protecție de rezervă împotriva defectelor în transformator (de exemplu, pentru un scurtcircuit în K), s-a introdus în schemă releul suplimentar de timp 7, reglat la un timp $t_{a7} > t_{a4}$. Acest releu este comandat direct de releul de curent 2.

La un scurtcircuit în K, neeliminat de către protecția de bază a transformatorului (protecția diferențială longitudinală), acționează releele 1, 4, 2 și 7, comandînd declanșarea tuturor întrerupătoarelor transformatorului.

La apariția unui defect pe partea de 110 kV, releul 4 comandă selectiv declanșarea întrerupătorului I_1, deoarece $t_{a4} < t_{a7}$, iar releul 5 este blocat de releul direcțional.

E. PROTECȚIA DIFERENȚIALĂ LONGITUDINALĂ

1. Compensarea inegalității curenților de la capetele zonei protejate

La generatoare, curenții primari de la capetele zonei protejate sînt aproximativ egali. La transformatoare, datorită tensiunilor diferite ale celor două bobinaje, acești curenți nu mai pot fi egali. Pentru ca protecția diferențială longitudinală să nu acționeze în regim normal de funcționare, este absolut necesar să se asigure egalitatea curenților secundari I_{s1} și I_{s2} ai transformatoarelor de curent TC_1 și TC_2 montate la capetele zonei protejate (fig. 9.14):

$$I_{s1} = \frac{I_{p1}}{n_{TC1}} = I_{s2} = \frac{I_{p2}}{n_{TC2}}. \tag{9.12}$$

În relația (9.12) I_{p1} și I_{p2} sînt curenții primari de la cele două capete ale zonei protejate, iar n_{TC1} și n_{TC2} sînt rapoartele de transformare ale transformatoarelor de curent. Rezultă:

$$\frac{I_{p2}}{I_{p1}} = \frac{n_{TC2}}{n_{TC1}} \simeq N_T, \tag{9.13}$$

unde N_T este raportul de transformare al transformatorului protejat T.

Dar, deoarece atît transformatorul protejat cît și transformatoarele de curent se fabrică numai cu anumite rapoarte de transformare standardizate, condiția exprimată de relația (9.13) nu este îndeplinită întotdeauna. Pre-

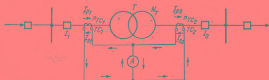


Fig. 9.14. Schema circulației curenților secundari în cazul protecției diferențiale longitudinale.

scripțiile admit ca în regim normal de funcționare diferența între curenții secundari de la cele două capete să fie cel mult 5%:

$$\Delta I_s\% = \frac{I_{s2} - I_{s1}}{I_{s1}} 100 \leqslant 5\%. \qquad (9.14)$$

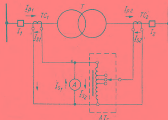


Fig. 9.15. Schema monofilară a protecției diferențiale longitudinale a transformatoarelor cu autotransformator de egalizare.

Pentru valori mai mari ΔI_s se folosesc *dispozitive de egalizare a curenților secundari*. Un astfel de dispozitiv este autotransformatorul (sau transformatorul) de egalizare.

În figura 9.15 este arătat modul de introducere a unui autotransformator de egalizare AT_E în schema protecției diferențiale longitudinale a transformatorului T; schema este figurată pentru o singură fază.

În locul ampermetrului A se montează un releu de curent al protecției diferențiale, care în regim normal sau la defecte exterioare este parcurs de curenții secundari I_{s1} și I'_{s2} egali și de sens contrar (în cazul cînd autotransformatorul egalizează exact curenții secundari de la capetele zonei protejate). Ca urmare, curentul prin releu este teoretic nul și protecția nu acționează.

Autotransformatorul AT_E este prevăzut cu mai multe prize reglabile, pentru a putea fi adaptate atunci cînd curenții secundari au valori diferite.

Tot pentru egalizarea curenților secundari se mai folosesc *bobine de egalizare*, care sînt fie montate pe miezul transformatoarelor intermediare cu saturație rapidă, descrise la protecția diferențială a generatoarelor, fie incluse în relee (ca în cazul releelor diferențiale cu frînare magnetică, care sînt prezentate în cele ce urmează).

2. Compensarea defazajului curenților

Datorită conexiunilor λ/Δ ale transformatoarelor protejate, între curenții primari de la capetele zonei protejate apare un defazaj de 30° sau multiplu de 30°, în funcție de grupa de conexiuni a transformatorului (fig. 9.16). Din cauza acestui defazaj, chiar la valori efective egale ale curenților secundari $\underline{I}_{s1}$ și $\underline{I}_{s2}$, prin releul protecției diferențiale circulă un curent $\underline{I}_r$, de natura unui curent de dezechilibru:

$$\underline{I}_r = \underline{I}_{s1} - \underline{I}_{s2}. \qquad (9.15)$$

Rezultă: $\underline{I}_r \neq 0$, deși $|\underline{I}_{s1}| = |\underline{I}_{s2}|$, ceea ce poate provoca acționarea nedorită a protecției.

Pentru valori ale defazajului mai mari de 30°, $\underline{I}_r$ poate atinge valori însemnate (v. fig. 9.16).

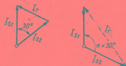


Fig. 9.16. Defazajul curenților secundari datorat conexiunilor diferite pe partea primarului.

În scopul compensării defazajului dintre curenții primari se adoptă conexiuni diferite pentru cele două grupe de transformatoare de curent, montate la capetele zonei prote-

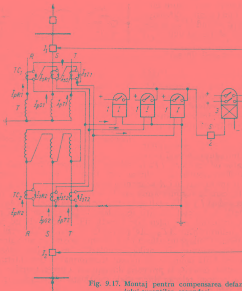


Fig. 9.17. Montaj pentru compensarea defazajului curenților secundari.

jate, și anume: pe partea stelei transformatorului protejat, secundarele transformatoarelor de curent se leagă în triunghi, iar partea triunghiului transformatorului protejat, secundarele transformatoarelor de curent se leagă în stea (fig. 9.17).

3. Șocul de curent de magnetizare

La conectarea la rețea a unui transformator în gol, precum și la restabilirea tensiunii, după lichidarea unui defect în rețeaua de alimentare (ca în cazul deconectării unei linii din amonte prin protecție și reconectării ei la barele stației de transformare, prin funcționarea *RAR*) se produce un șoc de curent de magnetizare cu valori ridicate (pînă la 6...8 ori curentul nominal prin transformator). Acest curent circulă numai prin primarul transformatorului protejat, și deci se transformă numai într-unul din grupurile de transformatoare de curent, provocînd apariția unui curent de dezechilibru prin releele protecției diferențiale, curent care poate provoca acționarea greșită a protecției.

Curentul de magnetizare de șoc are o pronunțată componentă aperiodică și un important conținut de armonica a 2-a. Ca urmare este indicată folosirea transformatoarelor cu saturație rapidă (*TSR*), care transformă slab com-

ponenta aperiodică, sau a releelor cu frînare magnetică sau cu frînare prin armonica a 2-a, deosebit de eficace împotriva șocului de curent de magnetizare.

4. Combaterea efectelor curenților de dezechilibru

Curentul de dezechilibru I_{dez} al protecției diferențiale a unui transformator are mai multe componente:

— curentul $I_{dez\,TC}$, care apare datorită neidentității caracteristicilor magnetice ale transformatoarelor de curent folosite; în cazul transformatoarelor, spre deosebire de generatoare, transformatoarele de curent montate la cele două capete ale zonei protejate sînt de tensiuni și puteri nominale diferite și au rapoarte de transformare și conexiuni diferite;

— curentul $I_{dez\,egaliz}$, care apare datorită inegalității curenților secundari la cele două capete ale zonei protejate; această componentă a curentului de dezechilibru apare fie în absența dispozitivelor de egalizare (pentru $\Delta I_s \leqslant \leqslant 5\%$), fie la egalizarea incompletă a curenților secundari, întrucît dispozitivul de egalizare prevăzut cu un număr limitat de prize de reglaj nu permite o variație continuă a curentului obținut la ieșirea sa;

— curentul $I_{dez\,reg}$, care apare datorită reglării tensiunii transformatorului protejat; modificarea raportului de transformare al transformatorului protejat cu $\pm$ 15% determină modificarea raportului dintre curentul primar și cel secundar, și deci apariția unui curent de dezechilibru, determinat de diferența curenților la capetele zonei protejate.

În cazul cel mai defavorabil, curentul de dezechilibru este egal cu suma algebrică a acestor trei componente aflate în fază:

$$I_{dez\,max} = I_{dez\,TC} + I_{dez\,egaliz} + I_{dez\,reg}. \tag{9.16}$$

Prin releele protecției diferențiale circulă un curent:

$$I_r = \frac{I_{dez\,max}}{n_{TC}}, \tag{9.17}$$

care poate provoca acționarea greșită a protecției.

Pentru a nu avea loc o acționare nedorită a protecției diferențiale, valoarea curentului de pornire al protecției trebuie aleasă astfel încît:

$$I_{pp} > I_{dez\,max}, \tag{9.18}$$

sau altfel exprimat:

$$I_{pp} = K_{sig} I_{dez\,max}, \tag{9.19}$$

unde K_{sig} este un coeficient de siguranță cu valoare supraunitară.

O valoare ridicată a curentului de pornire al protecției conduce la o sensibilitate redusă a protecției diferențiale a transformatorului $\left(\text{deoarece } K_{sens} = \frac{I_{sc\,min}}{I_{pp}}\right)$.

Pentru a se realiza o protecție diferențială mai sensibilă, cu un curent de pornire mai mic, este necesar să se adopte măsuri menite să reducă influența curenților de dezechilibru asupra protecției.

Una din aceste măsuri este utilizarea unor transformatoare de curent de clasă $5P$ și $10P$, destinate în mod special protecției diferențiale.

De asemenea, se folosesc transformatoare intermediare cu saturație rapidă *TSR*, care micșorează efectele neidentității caracteristicilor magnetice ale transformatoarelor de curent, sînt eficace împotriva componentei aperiodice a curentului de magnetizare de șoc și permit egalizarea curenților secundari din circuitul diferențial, datorită bobinelor de egalizare cu care sînt echipate.

Împotriva curenților de dezechilibru provocați de reglarea sub sarcină a tensiunii transformatorului protejat, care au o formă aproximativ sinusoidală, fără o componentă aperiodică, *TSR* nu au însă nici un efect. Pentru combaterea efectelor negative ale reglajului sub sarcină asupra protecției diferențiale longitudinale a transformatoarelor se folosesc *releele cu bobine de frînare*.

F. PROTECȚIA DIFERENȚIALĂ LONGITUDINALĂ A TRANSFORMATOARELOR UTILIZÎND RELEE CU BOBINE DE FRÎNARE

Funcționarea unui releu cu bobină de frînare este ilustrată în figura 9.18 prin intermediul unui releu electromagnetic; pe lîngă bobina de lucru, cu W_l spire, legată în derivație cu circuitul diferențial, pe miezul *1* se găsesc și una sau două bobine de frînare, cu W_f spire.

Armătura mobilă *2* a releului, prin rotația căreia contactul mobil *3* închide contactele fixe *4*, este acționată de:

— cuplul de lucru M_l, produs de curentul care circulă prin bobina de lucru;

— cuplul de frînare M_f, produs de curentul prin bobina de frînare și de resortul antagonist *r*.

Bobinele de frînare împiedică acționarea greșită a protecției sub acțiunea curentului I_{dez} care apare la scurtcircuite exterioare sau în regim normal de funcționare.

În cazul unui regim normal de funcționare sau al unui scurtcircuit exterior transformatorului, de exemplu în punctul K_1 (fig. 9.19), curenții din secundarele reductoarelor de curent care parcurg bobina de lucru W_l sînt de sens contrar (sau în opoziție). Cuplul de lucru produs de diferența acestor curenți, respectiv de curentul de dezechilibru, este neînsemnat. Cele două secții ale

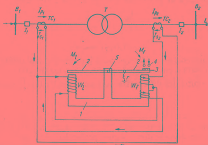


Fig. 9.18. Schema releului diferențial cu bobină de frînare.

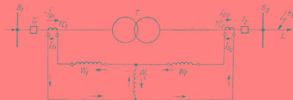


Fig. 9.19. Circulaţia curenţilor secundari prin bobinele releului diferenţial în cazul funcţionării normale sau al unui defect exterior.

bobinei de frînare W_f, parcurse de un curent mult mai mare, proporţional cu curentul nominal al transformatorului (în cazul regimului normal) sau cu curentul de defect (în cazul unui scurtcircuit exterior), creează un flux puternic care dă naştere unui cuplu de frînare; acesta împiedică rotaţia armăturii mobile în sensul închiderii contactelor, deci împiedică acţionarea releului diferenţial.

În acelaşi fel, chiar cînd bobina de lucru este parcursă de curentul de dezechilibru provocat de modificarea curenţilor primari I_{p1} şi I_{p2}, ca urmare a reglării sub sarcină a tensiunii transformatorului protejat, acţionarea greşită a releului este împiedicată.

În figura 9.20 este arătată circulaţia curenţilor prin bobinele releului diferenţial în cazul apariţiei unui scurtcircuit în interiorul zonei protejate, de exemplu în punctul K_2. În acest caz, bobina de lucru este parcursă de suma curenţilor secundari, deci de un curent foarte mare, proporţional cu curentul total de scurtcircuit. În acelaşi timp, curenţii prin secţiile bobinei de frînare sînt în opoziţie; ca urmare, cuplul de frînare este mult mai mic decît cuplul de lucru şi releul acţionează sigur; rotaţia armăturii mobile *2* (v. fig. 9.18) în jurul articulaţiei *5*, în sensul săgeţii reprezentînd acţiunea cuplului de lucru M_l, determină închiderea contactelor *3—4*.

Pentru ca releul cu bobină de frînare să acţioneze este necesar ca:

$$M_l \geq M_f. \qquad (9.20)$$

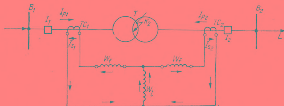


Fig. 9.20. Circulaţia curenţilor secundari prin bobinele releului diferenţial în cazul unui defect în interiorul zonei protejate.

Cuplul de lucru are expresia:

$$M_l = K_1 W_l^2 I_l^2, \qquad (9.21)$$

în care:

W_l este numărul de spire al bobinei de lucru;

I_l — curentul prin bobina de lucru;

K_1 — un coeficient de proporționalitate.

Cuplul de frînare M_f are două componente: M_{f1} reprezentînd cuplul antagonist, M_{antag} al resortului r şi M_{f2} reprezentînd cuplul de frînare propriu-zis, provocat de curentul prin bobina de frînare.

Rezultă expresia:

$$M_f = M_{f1} + M_{f2} = M_{antag} + K_2 W_f^2 I_f^2, \qquad (9.22)$$

în care:

W_f este numărul de spire al bobinei de frînare;

I_f — curentul prin bobina de frînare;

K_2 — un coeficient de proporționalitate.

Înlocuind în relația (9.20) expresiile (9.21) şi (9.22), se obține condiția de acționare a releului:

$$K_1 W_l^2 I_l^2 \geqslant M_{antag} + K_2 W_f^2 I_f^2. \qquad (9.23)$$

La egalitate se obține curentul de pornire al releului I_{pr}, adică cea mai mică valoare a curentului de lucru I_l pentru care condiția de acționare (9.23) mai este îndeplinită:

$$K_1 W_l^2 I_{l\,min}^2 = M_{antag} + K_2 W_f^2 I_f^2, \qquad (9.24)$$

unde:

$$I_{l\,min} = I_{pr}. \qquad (9.25)$$

Relația (9.24) reprezintă ecuația de acționare a releului şi exprimă dependența dintre valoarea curentului de pornire I_{pr} şi valoarea curentului prin bobina de frînare I_f. Reprezentarea grafică a dependenței $I_{pr} = f(I_f)$, cunoscută sub numele de caracteristica de acționare a releului cu bobină de frînare, prezentată în figura 9.21, este o hiperbolă (curba a din figură).

La valori foarte mari ale curentului de frînare, termenul M_{antag} din relația (9.24) devine neglijabil în comparație cu termenul $K_2 W_f^2 I_f^2$.

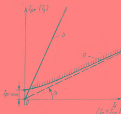


Fig. 9.21. Caracteristica de acționare a releului cu bobină de frînare.

Ca urmare, pentru domeniul valorilor mari I_f (teoretic $I_f \to \infty$) relația (9.24) devine:

$$K_1 W_l^2 I_{pr}^2 = K_2 W_f^2 I_f^2. \qquad (9.26)$$

Prin împărțire cu $K_1 W_l^2$ rezultă:

$$I_{pr}^2 = \frac{K_2 W_f^2}{K_1 W_l^2} I_f^2. \qquad (9.27)$$

şi respectiv:

$$I_{pr} = K_f I_f, \qquad (9.28)$$

unde:

$$K_f = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \cdot \frac{W_f}{W_l}.$$

Relația (9.28) este ecuația asimptotei la caracteristica de acționare, reprezentată în figura 9.21 printr-o linie întreruptă. Coeficientul K_f este denumit *coeficientul de frînare* și este numeric egal cu coeficientul unghiular al dreptei asimptotice:

$$K_f = \text{tg}\ \alpha. \tag{9.29}$$

În practică se adoptă pentru K_f valori cuprinse între 0,20 și 0,55.

Zona de deasupra curbei de acționare *a* (zona hașurată în fig. 9.21) reprezintă zona de acționare a releului, adică domeniul pentru care:

$$I_l \geqslant I_{l\,min} = I_{pr}.$$

Întrucît curentul I_f prin bobina de frînare înseriată în circuitul secundar al transformatoarelor de curent este aproximativ proporțional cu curentul primar, în abscisă se poate reprezenta, la o altă scară, curentul primar.

În cazul unui defect în interiorul zonei protejate (în transformator), prin bobina de lucru circulă un curent mare, aproximativ proporțional cu curentul total de scurtcircuit. Ținînd seama de proporționalitatea între curentul prin bobina de frînare și curentul primar, dependența liniară dintre curentul I_l prin bobina de lucru și curentul de scurtcircuit (deci curentul din primarul transformatoarelor de curent) își păstrează aspectul în planul de coordonate I_l și I_f, fiind reprezentată prin dreapta *b*. Din caracteristicile *a* și *b* din figură se constată că, în cazul unor valori mari ale curentului de scurtcircuit, deci în cazul unor defecte în transformator (scurtcircuite în interiorul zonei protejate), valorile curentului I_l prin bobina de lucru sînt mult mai mari decît cele ale curentului de pornire I_{pr} (dreapta *b* este deasupra curbei *a*) și protecția diferențială acționează corect și sigur.

În figura 9.22, *a* este reprezentată schema monofilară a unei protecții diferențiale a transformatorului realizată cu releul *RDS-3*, fabricat la noi în țară, la ICEMENERG. Pe coloana de mijloc a miezului magnetic sînt dispuse două bobine de egalizare W_{e1} și W_{e2} (ultima fiind nefolosită în cazul din figură) și înfășurarea (bobina) de lucru sau diferențială W_l; pe coloanele laterale sînt plasate secțiile bobinei de frînare W_f și cele ale înfășurării secundare W_s; ultima, avînd cele două secții legate în opoziție, alimentează releul de curent *1*.

Bobinele de egalizare servesc pentru egalizarea curenților secundari.

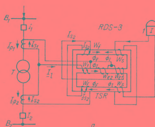
La transformatoarele cu trei înfășurări se utilizează ambele bobine de egalizare.

La releul *RDS-3* se realizează o frînare magnetică, întrucît curentul secundar I_{s2} (circulînd prin bobinele de frînare W_f) creează un flux de frînare $\varnothing_f$ care provoacă saturația miezului magnetic și înrăutățește astfel condițiile de transformare dintre bobina de lucru W_l (prin care circulă curentul de lucru I_l) și bobina secundară W_s, care alimentează releul sensibil *1*.

Schema conexiunilor interioare ale releului *RDS-3*, cu numărul de spire al bobinelor, este reprezentată în figura 9.22, *b* (pentru o singură fază).

La ICEMENERG au fost elaborate și fabricate releele electronice tranzistorizate (statice) *RDS-4* pentru protecții diferențiale. La aceste relee se realizează două acțiuni de frînare, una în funcție de un curent redresat ale cărui valori depind de cei doi curenți secundari I_{s1} și I_{s2}, iar a doua, în funcție de un alt curent redresat, ale cărui valori depind de conținutul în armonica a doua al curenților secundari.

Schema de principiu, pentru o singură fază, a releului diferențial static *RDS-4*, fabricat la noi în țară de către ICEMENERG, este reprezentată în figura 9.23.



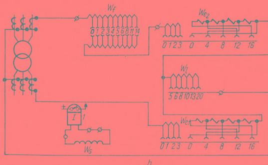


Fig. 9.22. Schema monofilară a protecției diferențiale a transformatorului realizată cu relee *RDS-3*:
a — schema de principiu; *b* — schema conexiunilor interioare ale releului *RDS-3*.

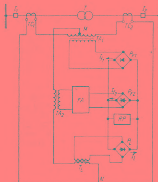


Fig. 9.23. Schema de principiu a releului diferențial static *RDS-4*.

Circuitul diferențial este alimentat de secundarele transformatoarelor de curent TC_1 și TC_2. Un transformator auxiliar TA_1, prevăzut cu o bornă mediană în bobinajul primar, alimentează puntea de redresare P_{F1}, care debitează curentul de frînare I_{f1}.

În cazul unui scurtcircuit exterior, cînd curenții primari I_1 și I_2 vor avea același sens convențional, curenții din cele două jumătăți ale bobinajului primar al transformatorului TA_1 vor avea de asemenea același sens. În consecință, atît curentul din bobinajul secundar al acestui transformator, cît și curentul debitat de puntea P_{F1} vor avea valori proporționale cu curentul de scurtcircuit exterior; acțiunea de frînare, datorită curentului I_{f1}, va fi puternică și va predomina.

Între borna mediană a bobinajului primar al transformatorului TA_1 (punctul M) și ramura cealaltă a circuitului diferențial (punctul N) sînt conectate bobinajele primare ale transformatorului auxiliar TA_2 și transformatorului de lucru TL. Prin aceste bobinaje, aflate în derivație pe circuitul diferențial, va circula curentul de lucru, reprezentînd diferența fazorială a curenților din secundarele transformatoarelor de curent TC_1 și TC_2. În regim normal de funcționare sau la un scurtcircuit exterior transformatorului protejat T, curentul de lucru și deci și curentul I_l debitat de puntea P_L vor avea valori neînsemnate, reprezentînd curentul de dezechilibru.

În cazul unui scurtcircuit în zona protejată curentul de lucru redresat I_l atinge valori însemnate și determină acționarea protecției.

Bobinajul secundar al transformatorului TA_2 alimentează un filtru de armonică a doua FA acordat pe frecvența de 100 Hz. Puntea P_{F2} alimentată de filtrul FA, debitează curentul de frînare I_{f2}. Curentul I_{f2} are valori mici la scurtcircuite în interiorul zonei protejate, deoarece conținutul în armonica a 2-a a curentului din bobinajul primar al transformatorului TA_2 este redus în aceste situații. Ca urmare, tensiunea la ieșirea filtrului FA este neînsemnată la scurtcircuite în zonă.

Prin circuitul de intrare al amplificatorului electronic detector de polaritate RP circulă un curent reprezentat de diferența dintre curentul de lucru I_l și suma curenților de frînare, I_{f1} și I_{f2}.

În cazul unui scurtcircuit în afara zonei protejate sau în cazul apariției unui curent de magnetizare de șoc (de exemplu, la punerea sub tensiune a transformatorului protejat), acțiunea de frînare este puternică și împiedică acționarea greșită a protecției. Astfel, la scurtcircuite exterioare, curentul de lucru I_l are o valoare redusă (reprezentînd un curent de dezechilibru), în vreme ce curentul de frînare I_{f1}, proporțional cu curentul de scurtcircuit exterior, are o valoare ridicată. La apariția curentului de magnetizare de șoc, curentul de frînare I_{f2} are o valoare importantă, ca urmare a conținutului ridicat în armonica a 2-a al curenților de magnetizare de șoc.

Filtrul FA este realizat astfel încît să aibă o sensibilitate cît mai mică în raport cu unda fundamentală și cu armonica a 3-a. În acest fel, rezultă un curent de frînare I_{f2} cît mai redus la defecte în interiorul zonei protejate, cînd saturația transformatoarelor de curent TC_1 și TC_2 poate determina apariția unor componente de curent de armonica a 3-a

Amplificatorul electronic detector de polaritate este realizat cu 4 tranzistoare.

Secţionarea de curent este o protecţie rapidă (netemporizată) realizată cu relee de curent, a cărei selectivitate este asigurată prin alegerea corespunzătoare a valorii curentului de pornire I_{pp}.

Transformatoarele de curent care alimentează secţionarea se instalează pe partea alimentării transformatorului. În figura 9.24 este reprezentată schema monofilară a transformatorului şi diagrama variaţiei curentului de scurtcircuit atunci cînd punctul de defect se deplasează de la capătul dinspre sursa de alimentare spre capătul opus al zonei protejate, crescînd distanţa l dintre protecţie şi defect. Cu cît punctul de scurtcircuit se îndepărtează de sursă, impedanţa cuprinsă între sursa de alimentare şi locul defectului creşte, iar valoarea curentului de scurtcircuit (notată în ordonată în diagrama din fig. 9.24) descreşte.

S-a notat cu $I''_{sc\,max\,K_1}$ valoarea supratranzitorie a componentei periodice a curentului de scurtcircuit în regim maxim, în cazul unui scurtcircuit trifazat în punctul exterior K_1 imediat după întrerupătorul liniei L. În scopul asigurării selectivităţii protecţiei, astfel încît secţionarea de curent să nu comande deconectarea transformatorului pentru defecte în afara zonei protejate, curentul de pornire al acesteia se stabileşte la o valoare superioară valorii $I''_{sc\,max\,K_1}$ conform relaţiei:

$$I_{pp} = K_{sig} I''_{sc\,max\,K_1}, \tag{9.30}$$

unde $K_{sig} = 1,3...1,6$.

Curentul de pornire al protecţiei este reprezentat în figură printr-o orizontală care intersectează curba de variaţie a curentului de scurtcircuit în punctul A.

Pentru zona din stînga punctului A, $I_{sc} > I_{pp}$. La apariţia defectului, curentul fiind mai mare decît curentul de pornire al protecţiei, secţionarea de curent acţionează, comandînd declanşarea întrerupătoarelor I_1 şi I_2, deci deconectarea transformatorului de la barele B_1 şi B_2. Această zonă reprezintă zona de acţionare sau zona de lucru a secţionării de curent şi se notează cu Z_a sau Z_l.

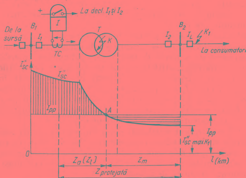


Fig. 9.24. Variaţia curentului de scurtcircuit la deplasarea punctului de defect.

Zona din dreapta punctului A reprezintă zona moartă a protecției și se notează cu Z_m. Dacă apar defecte în această zonă, curentul de scurtcircuit este mai mic decît curentul de pornire al protecției ($I_{sc} < I_{pp}$) și secționarea de curent nu acționează. După cum se constată din figură, zona moartă cuprinde conductoarele de legătură pînă la întrerupătorul I_2 și o parte din înfășurarea transformatorului de pe partea consumatorilor.

Defectele din zona moartă, la fel de periculoase ca și celelalte, urmează să fie lichidate, cu temporizarea corespunzătoare, de protecția maximală de curent a transformatorului.

În figura 9.25 este ilustrată schema unei secționări de curent realizată pe două faze.

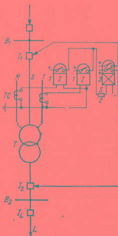


Fig. 9.25. Schema secționării de curent pe două faze.

H. PROTECȚIA CU RELEE DE GAZE

Curenții care apar în cazul unor defecte interne în transformator sînt în unele situații mici, atîta vreme cît defectul nu se extinde și deci nu sînt în măsură să determine acționarea protecției diferențiale a transformatorului și cu atît mai puțin a protecției maximale de curent temporizate. De aceea, la transformatoarele cu cuvă de ulei se montează *o protecție specială cu relee de gaze,* care acționează în cazul tuturor defectelor din interiorul cuvei transformatorului protejat.

Releul de gaze (fig. 9.26) este format dintr-o cameră cu pereți metalici, umplută cu ulei, în care plutesc două flotoare cilindrice F_1 și F_2, prevăzute cu contacte cu mercur sau cu întrerupătoare magnetice. Flotorul F_2 este solidar cu o paletă, care nu este reprezentată în figură.

Flotoarele se pot roti în jurul articulațiilor O_1 și O_2.

Releul de gaze se montează pe conducta de legătură dintre cuva transformatorului și conservatorul de ulei (fig. 9.27). În regim normal de funcționare,

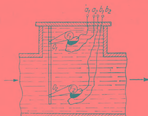


Fig. 9.26. Releu de gaze (reprezentare simplificată).

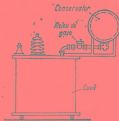


Fig. 9.27. Amplasarea releului de gaze.

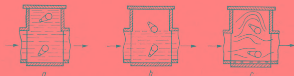


Fig. 9.28. Funcționarea releului de gaze.

camera releului este plină cu ulei și flotoarele se mențin ridicate. În această poziție, contactele cu mercur rămîn deschise și releul de gaze nu acționează (fig. 9.28, *a*).

Dacă în transformator se produce un defect, în stadiul inițial al acestuia are loc o degajare slabă de gaze.

Acestea se acumulează în partea de sus a camerei releului și refulează uleiul în jos. Primul flotor coboară (fig. 9.28, *b*), contactul său se închide (în această poziție a flotorului, mult înclinată, mercurul conduce, stabilind o legătură între cele două extremități ale conductorului flexibil) și permite transmiterea unui semnal.

În cazul unui defect grav în transformator se produce o degajare violentă de gaze care antrenează uleiul cu viteză, refulîndu-l în conservator. Din această cauză este răsturnat flotorul al doilea (fig. 9.28, *c*), care-și închide contactul cu mercur, prin care se comandă deconectarea rapidă a transformatorului de la ambele capete.

Datorită scurgerii turbulente a uleiului, flotoarele vibrează și contactele cu mercur se pot închide și deschide intermitent. Pentru a avea o acționare sigură la declanșare, contactul pentru declanșare al releului de gaze comandă un releu intermediar prevăzut cu autoreținere. Astfel, după cum se vede în figura 9.29, releul intermediar *RI* al protecției de gaze își efectuează prin unul din contacte autoreținerea, urmînd ca după funcționarea protecției să fie deblocat manual prin apăsare pe butonul *B*.

În alte variante de scheme, deblocarea se efectuează automat.

Dispozitivul de deconectare *DD* se comută în poziția *2* numai în timpul completării uleiului din cuvă; atunci, amestecul de ulei și aer care circulă prin releul de gaze ar putea determina coborîrea flotoarelor, și deci declanșarea greșită a transformatorului de la rețea.

La noi în țară se fabrică releele de gaze *RB-5h*, cu unul sau două plutitoare (cu contacte cu mercur), și releele de gaze *RB-5k*, cu unul sau două plutitoare (cu întrerupător magnetic).



Fig. 9.29. Schema protecției de gaze realizată cu un releu *RB*.

I. PROTECȚIA TRANSFORMATOARELOR ÎMPOTRIVA SCURTCIRCUITELOR MONOFAZATE

Normativul prevede instalarea unei protecții împotriva scurtcircuitelor monofazate pentru transformatoarele conectate la o rețea cu curenți mari de punere la pămînt (la tensiuni nominale de 110 kV și mai mari mult și în rețelele de joasă tensiune) și avînd surse de alimentare în rețeaua de la cealaltă tensiune.

În figura 9.30 este reprezentată schema protecției maximale de curent de secvență homopolară a transformatoarelor împotriva scurtcircuitelor monofazate, realizată cu *FCSH*. La apariția unui scurtcircuit monofazat exterior (de exemplu, în punctul K al liniei L din rețeaua de 110 kV), componenta homopolară a curentului provoacă acționarea releului maximal de curent *1*. Acesta, prin intermediul releului de timp *2* și al releului intermediar *4*, comandă, cu temporizarea t_{a2}, declanșarea întrerupătoarelor I_1 și I_2.

Pentru curentul de pornire al protecției se adoptă în practică valoarea:

$$I_{pp1} = (0,4 \dots 0,8)\, I_n. \tag{9.31}$$

Pentru a asigura selectivitatea protecției, temporizarea t_{a2} se alege cu o treaptă mai mare decît cea mai mare dintre temporizările protecțiilor împotriva scurtcircuitelor monofazate, cu care sînt prevăzute liniile legate la barele de 110 kV.

În alte variante de scheme, releul *1* este alimentat de un transformator de curent montat în circuitul de legare la pămînt a neutrului transformatorului protejat T (în serie cu separatorul Sp din fig. 9.30) și deci *FCSH* nu se mai instalează.

Protecțiile maximale de curent de secvență homopolară pot fi folosite numai dacă neutrul transformatorului protejat T este legat la pămînt. În cazul deconectării circuitului de legare la pămînt a neutrului (necesară din anumite condiții de funcționare a sistemului) deschiderea separatorului Sp determină închiderea unor contacte auxiliare ale acestui separator și introducerea în funcțiune a unei protecții maximale de tensiune de secvență homopolară, reprezentată în figura 9.31.

Releul maximal de tensiune *1* este alimentat de secundarul în triunghi deschis al transformatorului de tensiune TT, cu o tensiune proporțională cu componenta de secvență homopolară U_0 și comandă releul de timp *2*.

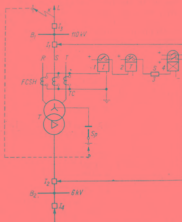


Fig. 9.30. Schema protecției transformatoarelor împotriva scurtcircuitelor monofazate realizată cu *FCSH*.

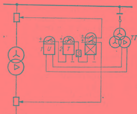


Fig. 9.31. Protecția homopolară a unui transformator al cărui neutru nu este legat la pămînt.

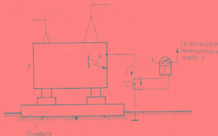


Fig. 9.32. Protecția împotriva defectelor monofazate în cuva transformatorului.

Împotriva defectelor monofazate (la pămînt) în interiorul cuvei transformatoarelor, conectate la rețele cu curenți mari de punere la pămînt, funcționînd la tensiuni de 110 kV și mai mari, se poate folosi o protecție specială, instalată pe circuitul care leagă la pămînt cuva metalică (fig. 9.32). Cuva este bine izolată față de postament și alte obiecte în contact cu pămîntul, avînd o singură legătură la pămînt, pe care se montează transformatorul de curent *TC*.

La funcționarea normală, prin *TC* circulă numai un curent capacitiv neînsemnat; la apariția unui defect cu punere la pămînt în interiorul cuvei pe partea de înaltă tensiune (ceea ce înseamnă străpungerea izolației în raport cu cuva transformatorului), prin transformatorul de curent, deci și prin releu, circulă un curent de ordinul unui curent de scurtcircuit monofazat și protecția comandă deconectarea transformatorului de la rețea. Această protecție este simplă, sigură și selectivă; valoarea de pornire adoptată în practică este:

$$I_{pp} = 40...50 \text{ A}.$$

Pentru transformatoarele de puteri pînă la 25 MVA, Normativul permite ca protecția diferențială longitudinală să fie înlocuită cu protecția de cuvă.

J. PARTICULARITĂȚILE PROTECȚIEI PRIN RELEE A AUTOTRANSFORMATOARELOR

În cazul unui autotransformator (fig. 9.33) apar aceleași regimuri anormale de funcționare și aceleași defecte ca și la transformatoare. De aceea, prescripțiile prevăd pentru autotransformatoare în general aceleași tipuri de protecții ca și la transformatoare.

Datorită deosebirilor constructive ale autotransformatoarelor față de transformatoare și în special datorită legăturii electrice pe care acestea o realizează între două rețele de tensiuni diferite, protecția prin relee a autotransformatoarelor prezintă unele particularități.

Printre acestea se numără următoarele:

— neutrul autotransformatorului fiind legat electric la două rețele de tensiuni diferite (cazul autotransformatorului conectat la trei tensiuni —

fig. 8.33, *b*), protecțiile împotriva scurtcircuitelor monofazate exterioare trebuie realizate separat, pentru fiecare din cele două tensiuni; numai în acest fel se asigură funcționarea selectivă a protecției, autotransformatorul continuînd să rămînă conectat la cealaltă rețea (fără defect) și la rețeaua de medie tensiune;

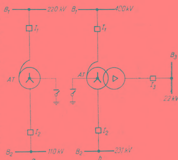


Fig. 9.33. Autotransformatoare:
a — funcționînd pe două tensiuni; *b* — funcționînd pe trei tensiuni.

— șocul de curent de magnetizare față de care trebuie desensibilizată protecția diferențială este mai mic la autotransformatoare decît la transformatoare, datorită dimensiunilor mai mici ale miezului în cazul autotransformatoarelor;

— la autotransformatoarele de puteri egale sau mai mari decît 200 MVA (la care normativul prevede protecții de distanță împotriva supraintensităților provocate de scurtcircuite exterioare), se instalează relee de distanță pe ambele tensiuni ale bobinajelor legate în stea.

K. SCHEMA DE ANSAMBLU A PROTECȚIILOR UNUI TRANSFORMATOR

În figura 9.34 este reprezentată schema de ansamblu cu protecțiile unui transformator ridicător, cu două înfășurări, avînd puterea mai mare de 4000 kVA.

Releele *1* și *2* asigură protecția împotriva suprasarcinilor. Protecția maximală de curent temporizată împotriva supraintensităților provocate de scurtcircuitele exerioare trifazate simetrice cuprinde releele *3*, *4*, *5* și *8*.

Pentru o mai bună sensibilitate a protecției, în cazul scurtcircuitelor exterioare nesimetrice s-a prevăzut filtrul de curent de secvență inversă *6* (FCSI), împreună cu releul de curent *7* și releul de timp *8*. Releul de timp *8* este comun celor două protecții.

În componența protecției maximale de curent împotriva scurtcircuitelor exterioare monofazate din rețeaua de înaltă tensiune intră: releul de curent *9*, alimentat cu curent homopolar de la *FCSH*, și releul de timp *10*.

Protecția de bază, rapidă, împotriva defectelor interne în transformator este realizată cu relee diferențiale cu frînare magnetică *RDS 11*, *12* și *13*. Schema mai cuprinde releul de gaze *14*, avînd un contact pentru semnalizare și altul pentru declanșare, și releul intermediar de ieșire *15*, comun pentru toate protecțiile, care comandă declanșarea întrerupătoarelor I_1 și I_2.

Datorită particularităților releului de gaze, releul intermediar *15* este prevăzut cu autoreținere.

Deblocarea releului și revenirea în poziția de repaus se efectuează automat, după declanșarea întrerupătoarelor I_1 și I_2; contactele auxiliare ale acestor întrerupătoare se deschid și astfel întrerup circuitele unor bobine supli-

Fig. 9.34. Schema de ansamblu a protecţiilor unui transformator ridicător cu două înfăşurări avînd puterea mai mare de 4 000 kVA.

mentare de autoreţinere din interiorul releului, legate în serie cu contactele acestuia.

Protecţia maximală de curent împotriva scurtcircuitelor exterioare simetrice este completată cu un blocaj de tensiune minimă. Releul *4* al blocajului este alimentat de secundarul transformatorului de tensiune, conectat la barele de 10 kV.

Releele de semnalizare *S* pun în evidenţă funcţionarea diferitelor protecţii.

● Transformatoarele şi autotransformatoarele sînt prevăzute cu protecţii maximale de curent sau cu protecţii de distanţă împotriva scurtcircuitelor exterioare, cu protecţii maximale de curent împotriva suprasarcinilor, cu protecţii diferenţiale, protecţii de cuvă sau secţionări de curent împotriva scurtcircuitelor în interiorul zonei protejate, cu protecţii cu relee de gaze împotriva defectelor în cuva de ulei şi a scăderii nivelului uleiului şi cu protecţii homopolare împotriva scurtcircuitelor monofazate.

● Curentul de pornire al protecţiilor maximale de curent se calculează în funcţie de curentul de sarcină maximă care apare la autopornirea motoarelor electrice alimentate de transformator sau la deconectarea unui transformator funcţionînd în paralel cu cel protejat.

● La transformatoarele cu trei bobinaje, protecţia maximală de curent se realizează cu mai multe grupuri de transformatoare de curent şi de relee maximale de curent, iar în cazul transformatoarelor cu alimentare bilaterală, în schema protecţiei maximale de curent se introduc şi relee direcţionale.

● Pentru realizarea protecţiei diferenţiale este necesar să se ia măsuri de compensare a inegalităţii amplitudinilor şi defazajelor curenţilor de la capetele zonei protejate şi de combatere a efectelor curentului de dezechilibru şi curentului de magnetizare de şoc.

● Principala cale de combatere a efectelor curenţilor de dezechilibru constă în utilizarea releelor cu acţiune de frînare.

● Secţionarea de curent înlocuieşte protecţia diferenţială la transformatoare de puteri mai reduse. Selectivitatea secţionării de curent este asigurată prin alegerea curentului de pornire în funcţie de curentul de scurtcircuit maxim exterior.

● Releele de gaze au unul sau două flotoare şi se montează pe conducta dintre conservator şi cuvă.

● Protecţiile homopolare de curent sau tensiune asigură protecţia împotriva scurtcircuitelor monofazate.

VERIFICAREA CUNOŞTINŢELOR

1. Cum se calculează curentul de pornire al protecţiei maximale de curent a transformatoarelor?
   a) în funcţie de curentul de scurtcircuit maxim?
   b) în funcţie de curentul de scurtcircuit minim?
   c) în funcţie de curentul de sarcină maximă?
2. În ce caz este necesară introducerea unor relee direcţionale în schema protecţiei maximale de curent?
   a) în cazul transformatoarelor cu două bobinaje?
   b) în cazul transformatoarelor cu trei bobinaje cu alimentare bilaterală?
   c) în cazul transformatoarelor cu trei bobinaje cu alimentare unilaterală?

3. În ce scop se introduc autotransformatoarele de egalizare în schema protecției diferențiale?
   a) pentru compensarea inegalității curenților de la capetele zonei protejate?
   b) pentru compensarea defazajelor dintre curenții de la capetele zonei protejate?
   c) pentru combaterea efectelor curentului de magnetizare de șoc?
4. Care este varianta de realizare a acțiunii de frînare la releul RDS-3 fabricat la ICEMENERG?
   a) frînare magnetică?
   b) frînare prin curenți redresați?
   c) frînare în funcție de armonica a 2-a?
5. Cum se calculează curentul de pornire al secționării de curent pentru asigurarea selectivității?
   a) în funcție de curentul nominal?
   b) în funcție de curentul de sarcină maximă?
   c) în funcție de curentul de scurtcircuit maxim exterior?
6. Cum se obține asigurarea executării comenzii de declanșare transmisă de releele de gaze în condițiile vibrației plutitoarelor, ca urmare a scurgerii turbulente a uleiului la scurtcircuit în interiorul cuvei?
   a) prin folosirea unui releu intermediar cu autoreținere?
   b) prin folosirea unor dispozitive mecanice de amortizare?
   c) prin folosirea unor elemente hidraulice suplimentare?
7, Unde se montează transformatorul de curent al protecției de cuvă?
   a) în circuitul de tensiune ridicată?
   b) în circuitul de tensiune coborîtă?
   c) pe un conductor de legare la pămînt al cuvei?

CAPITOLUL 10

PROTECȚIA BLOCURILOR GENERATOR-TRANSFORMATOR

A. PROTECȚII PREVĂZUTE PENTRU BLOCURI

Blocurile generator-transformator se protejează împotriva defectelor și regimurilor anormale de funcționare.

În principiu, normativul prevede pentru blocurile generator-transformator aceleași tipuri de protecții prin relee, ca și pentru generatoarele și transformatoarele (autotransformatoarele) racordate la bare colectoare.

Se deosebesc însă unele particularități, datorită cuplajului magnetic dintre generator și rețeaua electrică și apar unele protecții comune pentru întregul bloc.

Blocurile generator-transformator se echipează cu următoarele protecții:

— *protecția maximală de curent împotriva supraintensităților provocate de suprasarcini și de scurtcircuite exterioare*;

— *protecția diferențială longitudinală împotriva scurtcircuitelor între faze*;

— *protecția împotriva punerilor la pămînt monofazate în statorul generatorului și în bobinajul de tensiune inferioară al transformatorului*;

— *protecția împotriva scurtcircuitelor monofazate exterioare* (în cazul cînd blocul debitează pe o rețea de tensiune înaltă, cu curenți mari de punere la pămînt);

— *protecția de gaze a transformatorului*;

— *protecții specifice ale generatorului*: protecția împotriva scurtcircuitelor între spirele aceleiași faze, protecția împotriva punerii la pămînt rotorice, protecția împotriva reducerii accidentale a curentului de excitație, protecția împotriva trecerii accidentale a generatorului în regim de motor.

Primele trei protecții sînt comune, generatorul și transformatorul blocului reprezentînd împreună zona protejată. Celelalte protecții au zona protejată constituită fie numai din transformator, fie numai din generator.

B. PARTICULARITĂȚILE PROTECȚIEI MAXIMALE DE CURENT LA BLOCURILE GENERATOR-TRANSFORMATOR

Blocurile generator-transformator sînt prevăzute cu protecții maximale de curent temporizate, cu sau fără blocaj de tensiune minimă, împotriva supraintensităților provocate de scurtcircuite exterioare sau de suprasarcini.

La blocurile generator-transformator cu două înfășurări, protecția maximală de curent este comună pentru întregul bloc și este realizată la fel ca la

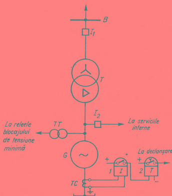


Fig. 10.1. Schema monofilară a protecției maximale de curent la blocurile generator-transformator cu două înfășurări.

generatoare. Releele de curent *I* ale protecției sînt alimentate de la transformatoarele de curent *TC*, montate spre neutrul generatorului (fig. 10. 1).

Dacă blocul are și derivație pentru alimentarea serviciilor interne, protecția maximală de curent temporizată a blocului se realizează cu două temporizări. După prima temporizare (a primului releu de timp) se comandă declanșarea întrerupătorului I_1 prin care blocul este legat la bare, generatorul continuînd să alimenteze serviciile interne; în cazul în care scurtcircuitul exterior persistă, după a doua temporizare (datorită unui al doilea releu de timp) se comandă și declanșarea întrerupătorului I_2 de pe derivația spre serviciile interne.

La blocurile generator-transformator cu trei înfășurări, cu surse pe toate tensiunile, se prevede cîte o protecție maximală de curent temporizată pe partea fiecărei tensiuni. Protecția maximală de la tensiunea generatorului se montează tot spre neutrul acestuia.

Scopul acestor protecții este de a asigura selectivitatea lichidării supraintensităților provocate de defectele exterioare din rețelele de înaltă și medie tensiune. Deoarece funcționarea selectivă nu se poate asigura numai prin temporizare, una din protecțiile de pe părțile cu tensiune ridicată se direcționează. În acest scop, în schema protecției se introduc relee direcționale, cum s-a ilustrat și în figura 9.13 pentru protecția maximală de curent a transformatoarelor cu trei bobinaje, cu alimentare bilaterală.

De regulă, la blocurile de puteri mari, protecția maximală de curent montată pe neutrul generatorului se realizează în varianta, mai sensibilă, cu filtru de curent de secvență inversă *FCSI*.

C. PROTECȚIA DIFERENȚIALĂ LONGITUDINALĂ A BLOCURILOR

Protecția diferențială longitudinală a blocurilor generator-transformator reprezintă protecția de bază, rapidă, împotriva defectelor în interiorul zonei protejate. Ea se realizează în cele trei variante principale prezentate în figura 10.2.

La blocurile fără întrerupător între generatorul *G* și transformatorul *T* (fig. 10.2, *a*), se poate prevede o protecție diferențială longitudinală comună pentru întregul bloc, care cuprinde în circuitul diferențial și secundarul transformatorului de curent montat pe derivația spre serviciile interne. Releele diferențiale comandă declanșarea tuturor întrerupătoarelor și a automatului de dezexcitare rapidă *ADR*.

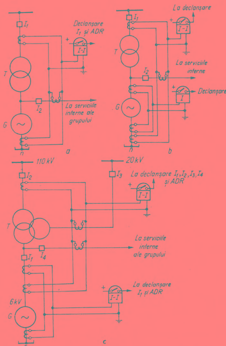


Fig. 10.2. Variante de realizare a protecției diferențiale longitudinale la blocurile generator-transformator (autotransformator); scheme monofilare.

Curentul de pornire al protecției diferențiale se calculează din condiția de desensibilizare a protecției față de curenții de dezechilibru.

Dacă rezultă o valoare de pornire:

$$I_{pp} > 1{,}3\ I_{n\,gen}, \qquad (10.1)$$

unde $I_{n\,gen}$ este curentul nominal al generatorului, protecția realizată după această schemă nu este suficient de sensibilă. În acest caz se prevede o protecție diferențială suplimentară, separată pentru generator, rezultînd schema din figura 10.2, *b*.

Deoarece pentru protecția diferențială suplimentară (a generatorului) rezultă un curent de pornire mai mic decît pentru protecția diferențială a întregului bloc (se știe că în cazul generatoarelor curenții de dezechilibru, în

raport cu care se determină I_{pp}, sînt mult mai mici decît la transformatoare), se asigură o sensibilitate mai ridicată pentru protecția celui mai important element al blocului: generatorul sincron.

La generatoarele care sînt dotate cu instalații speciale de stingere a incendiilor din mașină se montează o protecție diferențială a generatorului sincron, indiferent de valoarea găsită pentru curentul de pornire al protecției diferențiale comune.

De asemenea, dacă în componența blocului intră un turbogenerator de 100 MW sau mai mult, sau un hidrogenerator pentru care se cere ca valoarea curentului de pornire al protecției să nu depășească valoarea curentului nominal, varianta din figura 10.2, *b* devine obligatorie.

În sfîrșit, pentru blocurile care au întrerupător între generator și transformator se instalează protecții diferențiale separate ale generatorului și transformatorului, ca în figura 10.2, *c*. Montarea transformatoarelor de curent se face astfel încît zonele de protecție să se întrepătrundă, pentru a nu rămîne nici un punct în afara zonei protejate. Circuitul diferențial al protecției transformatorului cuprinde și secundarele transformatoarelor de curent de pe derivația spre serviciile interne ale blocului.

Protecția diferențială longitudinală a generatorului *G* comandă declanșarea *ADR* și a întrerupătorului I_1 dintre generator și transformatorul *T*. În acest fel, la un defect intern în generator acționează numai protecția generatorului, deconectîndu-l, fără a se întrerupe alimentarea serviciilor interne (din rețea) și funcționarea transformatorului pe celelalte două tensiuni. Protecția diferențială longitudinală a transformatorului comandă declanșarea tuturor întrerupătoarelor și a *ADR*, deoarece la un defect în zona de acționare a acestei protecții continuarea funcționării generatorului nu mai are sens.

D. ALTE PROTECȚII ALE BLOCURILOR

În afară de protecția maximală de curent și protecția diferențială longitudinală, protecția generală a blocului generator-transformator mai cuprinde și alte protecții.

Astfel, împotriva scurtcircuitelor monofazate exterioare, apărute pe partea cu tensiunea $U \geqslant 110$ kV, se folosește o protecție realizată cu un releu maximal de curent (alimentat de la filtrul de curent de secvență homopolară) și cu un releu de timp care comandă declanșarea întrerupătorului aferent barelor pe partea cărora s-a produs defectul.

Împotriva scurtcircuitelor interne în transformator acționează protecția cu relee de gaze. Ca și protecția diferențială, protecția de gaze a transformatorului comandă declanșarea generală a blocului.

Pentru protecția generatorului și a înfășurării de tensiune inferioară a transformatorului împotriva punerilor la pămînt monofazate, blocurile generator-transformator sînt prevăzute cu o protecție de tensiune homopolară, care transmite de regulă un semnal cu temporizare (deoarece curenții de punere la pămînt sînt mici, fiind determinați doar de capacitatea față de pămînt a bobinajului generatorului și a părții de joasă tensiune a transformatorului).

În figura 10.3 este reprezentată schema protecției unui bloc generator-transformator împotriva punerilor la pămînt pe partea tensiunii generatorului.

Releul maximal de tensiune *1* este alimentat de la secundarul în triunghi deschis al unui transformator de tensiune *TT*, legat într-un punct aflat între

generator şi transformator. La bornele secundarului în triunghi deschis al transformatorului TT se obţine o tensiune proporţională cu componenta de secvenţă homopolară $\underline{U}_0$, rezultată din însumarea geometrică a unor tensiuni proporţionale cu tensiunile pe fază.

În regim normal de funcţionare $U_0 \cong 0$ şi releul nu acţionează. Dacă apare o punere la pămînt pe partea tensiunii generatorului, rezultă o tensiune homopolară de valoare însemnată şi releul de tensiune *1* acţionează, semnalizînd cu temporizare apariţia defectului monofazat. Prin introducerea temporizării (deci a releului de timp *2*) se evită funcţionarea protecţiei în cazul unor puneri la pămînt trecătoare, de scurtă durată.

În practică se adoptă pentru tensiunea de pornire a releului *1* valoarea $U_{pr} = 15$V.

Voltmetrul *V* serveşte pentru controlul periodic al tensiunii la bornele releului.

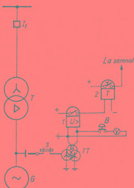


Fig. 10.3. Schema protecţiei unui bloc generator-transformator împotriva punerilor la pămînt pe partea tensiunii generatorului.

O altă variantă de schemă pentru protecţia blocurilor generator-transformator împotriva punerilor la pămînt monofazate pe partea tensiunii generatorului este reprezentată în figura 10.4. Această variantă se deosebeşte de cea anterioară prin faptul că releul maximal de tensiune *1* este alimentat de bobinajul secundar al unui transformator de tensiune special *TT*, care are bobinajul primar legat între neutrul generatorului şi pămînt.

Ca urmare, releul controlează diferenţa de potenţial dintre neutrul generatorului şi pămînt, care în regim normal are valori reduse, reprezentînd de fapt o tensiune de dezechilibru, determinată îndeosebi de prezenţa armonicei a treia.

La o punere la pămînt în zona menţionată are loc apariţia componentei homopolare $\underline{U}_0$ şi deci modificarea potenţialului punctului neutru al generatorului, care nu mai are valoarea practic nulă din regimul normal (apariţia unui potenţial diferit de zero al neutrului generatorului este denumită şi „deplasarea neutrului"). Ca urmare, releul *1* acţionează şi comandă releul de timp *2*.

Ambele variante analizate au dezavantajul că nu asigură acoperirea întregii zone protejate. Astfel, tensiunea de pornire fiind $U_{pr} = 15$ V (pentru o tensiune secundară nominală de 100 V a transformatoarelor de tensiune), rezultă că pentru defecte pe o porţiune de 15% din înfăşurarea generatorului, începînd de la neutrul generatorului, protecţia nu va acţiona, întrucît tensiunea aplicată releului maximal de tensiune *1* va fi mai mică de 15 V, deci mai mică decît tensiunea de pornire. Această porţiune reprezintă deci o zonă moartă a protecţiei.

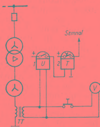


Fig. 10.4. Protecţia blocurilor împotriva punerilor la pămînt.

Pentru eliminarea zonei moarte, au fost elaborate scheme în care se prevede aplicarea unei tensiuni alternative între neutrul generatorului și pămînt (printr-un transformator suplimentar, numit transformator de deplasare), care realizează o deplasare permanentă neutrului. Pentru ca protecția să nu acționeze în regim normal ca urmare a acestei deplasări, se prevede un element de compensare care compensează (prin injectarea unui curent egal și de sens opus) curentul determinat de deplasarea permanentă.

La apariția unei puneri la pămînt în orice punct al zonei protejate compensarea menționată a curenților nu mai are loc, întrucît apare un curent de defect, ceea ce determină acționarea protecției.

Asemenea variante de scheme, care elimină zona moartă, sînt denumite *scheme de protecție integrală împotriva punerilor la pămînt monofazate pe partea tensiunii generatorului*.

Pentru generatoarele de puteri mari (100 MW și mai mult) funcționînd în bloc cu transformatoare se recomandă și protecții împotriva reducerii accidentale a curentului de excitație și împotriva trecerii accidentale în regim de motor, prezentate în capitolul 8.

În cazul cînd în componența blocurilor intervin hidrogeneratoare, se prevede și protecția împotriva creșterii tensiunii la bornele generatorului.

Ca protecție de rezervă împotriva defectelor în generatorul blocului se poate instala și o protecție de distanță, menționată de asemenea în capitolul 8.

Toate aceste protecții sînt indicate în schema de ansamblu din figura 10.5.

E. SCHEMA DE ANSAMBLU A PROTECȚIILOR UNUI BLOC GENERATOR-TRANSFORMATOR

Schema de ansamblu a protecțiilor unui bloc generator-transformator de mare putere (peste 100 MW) și debitînd pe bare de 400 kV este reprezentată în figura 10.5, folosind semnele convenționale pentru schemele de amplasare, indicate în tabelele 7.3 și 7.4.

Între generatorul *G* și transformatorul *T* se găsește întrerupătorul de sarcină *IS*, care permite ca pornirea blocului să se efectueze prin intermediul transformatorului de servicii interne *TSI*, alimentat din rețeaua de 400 kV prin transformatorul *T* al blocului, întrerupătorul de sarcină *IS* fiind deschis.

Transformatorul *TE* alimentează redresorul cu tiristoare *RT*, care furnizează curentul de excitație al generatorului.

Deconectarea blocului de la sistem se realizează prin comanda declanșării întrerupătorului *I — 1*.

Protecțiile diferențiale cu acțiune de frînare *1* și *2* asigură protecția de bază a generatorului și transformatorului, fiind realizate în varianta din figura 10.2, *c*. Protecția diferențială *3* este prevăzută pentru transformatorul de servicii interne *TSI*.

Împotriva scurtcircuitelor între spirele aceleiași faze din statorul generatorului (realizat cu un singur bobinaj pe fază) este prevăzută protecția de tensiune homopolară *4*, menționată în capitolul 8.

Protecția *5* este prevăzută împotriva punerilor la pămînt monofazate în statorul generatorului și în bobinajul de tensiune inferioară a transformatorului, fiind realizată în varianta de protecție integrală, fără zonă moartă. Transformatorul *TD* creează o deplasare permanentă a neutrului generatorului (alimentarea primarului acestui transformator nu este reprezentată în schemă), iar de la bornele rezistenței *R* — prin intermediul căreia este legat la pămînt

Fig. 10.5. Schema de amplasare cu ansamblul protecţiilor unui bloc generator-transformator.

neutrul generatorului — este alimentat un transformator de tensiune într-o schemă analoagă cu cea din figura 10.4.

Protecţia *6* este tot o protecţie de tensiune homopolară şi are rolul de a acţiona dacă apar puneri la pămînt în bobinajul de tensiune inferioară al transformatorului *T* (sau în bobinajul primar al transformatorului *TSI*) cînd întrerupătorul de sarcină *IS* este deschis şi deci protecţia *5* nu poate sesiza apariţia acestor defecte.

Protecţia maximală de curent *7* este prevăzută împotriva supraintensităţilor provocate de suprasarcini şi de scurtcircuite exterioare, iar protecţia maximală de tensiune *8* este prevăzută împotriva creşterii tensiunii la bornele generatorului.

Protecțiile *9* și *10* sînt protecții rotorice. Protecția *9* acționează la apariția unei puneri la pămînt în rotor, iar protecția *10* la reducerea accidentală a curentului de excitație. Împotriva trecerii accidentale a generatorului în regim de motor este prevăzută protecția *11*, care controlează sensul de circulație a puterii active.

Protecția de distanță *12* este o protecție de rezervă împotriva scurtcircuitelor în zona protejată (generator și transformator) sau exterioare, iar protecțiile maximale de curent *13*, *14* și *15* sînt prevăzute pentru redresorul cu tiristoare *RT* și transformatoarele *TSI* și *TE*.

REZUMAT

● Protecția maximală de curent a blocurilor generator-transformator cu două bobinaje se instalează pe partea neutrului generatorului. În cazul blocurilor generator-transformator cu trei bobinaje se montează cîte o protecție maximală de curent pe partea fiecărei tensiuni, cea de la tensiunea generatorului instalîndu-se spre neutrul acestuia.

● În funcție de caracteristicile schemei și elementelor blocului (generatorul și transformatorul) și de valoarea obținută pentru curentul de pornire, protecția diferențială a blocurilor se realizează în una din următoarele trei variante: o singură protecție diferențială comună; o protecție comună și o protecție a generatorului; o protecție a transformatorului și o protecție a generatorului.

● Pentru protecția împotriva punerilor la pămînt monofazate în statorul generatorului și în bobinajul de tensiune inferioară al transformatorului se folosește o protecție de tensiune homopolară, realizată cu un releu maximal de tensiune alimentat de la secundarul în triunghi deschis al unui transformator de tensiune instalat între generator și transformator sau de la un transformator de tensiune conectat între neutrul generatorului și pămînt.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Unde se montează transformatoarele de curent care alimentează protecția maximală de curent a blocurilor generator-transformator cu două bobinaje?
   a) pe tensiunea înaltă a transformatorului?
   b) între generator și transformator?
   c) spre neutrul generatorului?
2. La ce categorie de blocuri generator-transformator se utilizează cîte o protecție diferențială separată pentru generator și transformator?
   a) la blocuri cu transformatoare cu două bobinaje și cu turbogeneratoare de peste 100 MW ?
   b) la blocuri cu transformatoare cu două bobinaje și cu hidrogeneratoare?
   c) la blocuri cu transformatoare cu trei bobinaje?
3. Cum se realizează protecția împotriva punerilor la pămînt monofazate în statorul generatorului și în bobinajul de joasă tensiune al transformatorului?
   a) ca protecție de tensiune homopolară?
   b) ca protecție diferențială?
   c) ca protecție direcțională?

CAPITOLUL 11

PROTECȚIA BARELOR COLECTOARE

A. PRINCIPII DE REALIZARE

Defectele apărute pe barele colectoare pot avea consecințe grave, conducînd la întreruperea funcționării tuturor instalațiilor racordate la bare, și deci la pagube importante, determinate de oprirea consumatorilor alimentați de barele respective.

Din punctul de vedere al protecției, defectele pe bare pot fi lichidate fie de protecții speciale ale barelor, fie de protecții ale elementelor racordate la barele colectoare; prima variantă este cea mai utilizată în practică. A doua variantă poate fi folosită numai pentru bare de importanță secundară, deoarece în acest caz defectele pe bare sînt defecte exterioare pentru protecțiile elementelor racordate la bare și ca urmare, defectele respective sînt lichidate cu temporizare.

Dintre protecțiile speciale ale barelor (din cadrul primei variante, care poate asigura condițiile de rapiditate și selectivitate), cele mai utilizate sînt protecțiile diferențiale. Se mai folosesc protecții comparative de direcție și de fază, iar pentru circuitele în care se găsesc cuple transversale între diferite sisteme de bare se utilizează protecții maximale de curent și secționări de curent.

Protecția diferențială a barelor colectoare se poate realiza ca protecție diferențială completă sau ca protecție diferențială incompletă.

B. PROTECȚIA DIFERENȚIALĂ COMPLETĂ, CU RELEE FĂRĂ ACȚIUNE DE FRÎNARE

Pentru realizarea acestei protecții se prevăd transformatoare de curent în circuitele tuturor elementelor racordate la bare, bobinajele secundare ale acestor transformatoare (cu rapoarte de transformare egale) fiind conectate într-o schemă diferențială. Folosind o reprezentare monofilară pentru un sistem simplu de bare (fig. 11.1), schema diferențială rezultă unind între ele bornele dinspre barele colectoare, și bornele bobinajelor secundare dinspre exteriorul zonei protejate, iar în derivație se conectează releul de curent *1*. Releul intermediar *2* — comandat de releul de curent *1* prin intermediul releului de semnalizare serie *S* — are un număr mai mare de contacte și transmite comanda de declanșare tuturor întrerupătoarelor elementelor racordate la bare.

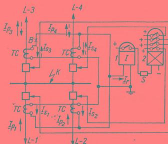


Fig. 11.1. Realizarea protecţiei diferenţiale complete a unui sistem simplu de bare colectoare (reprezentate pentru o singură fază).

În zona protejată, delimitată de transformatoarele de curent TC, sînt incluse barele colectoare şi mici porţiuni ale elementelor racordate; pentru simplificare se presupune că aceste elemente sînt liniile L-1, L-2, L-3 şi L-4, barele fiind alimentate cu energie prin primele două linii şi debitînd energie prin celelalte două linii.

În regim normal de funcţionare, curenţii primari şi secundari au în consecinţă sensurile convenţionale indicate prin săgeţile pline, şi deci prin releu circulă un curent $\underline{I}_r$, avînd expresia:

$$\underline{I}_r = \underline{I}_{s1} + \underline{I}_{s2} - (\underline{I}_{s3} + \underline{I}_{s4}). \tag{11.1}$$

Aplicînd teorema lui Kirchhoff la nodul reprezentat de barele colectoare, rezultă relaţia:

$$\underline{I}_{p1} + \underline{I}_{p2} = \underline{I}_{p3} + \underline{I}_{p4}, \tag{11.2}$$

exprimînd egalitatea dintre suma curenţilor care intră în nod şi suma curenţilor care ies din nod.

Din relaţia (11.2) se obţine:

$$\underline{I}_{p1} + \underline{I}_{p2} - (\underline{I}_{p3} + \underline{I}_{p4}) = 0. \tag{11.3}$$

Avînd în vedere că toate transformatoarele de curent au acelaşi raport de transformare, din compararea relaţiilor (11.1) şi (11.3) rezultă că, în regimul normal considerat, curentul prin releu I_r are o valoare redusă, egală cu valoarea curentului de dezechilibru. Acest curent, ca şi în cazul protecţiilor diferenţiale ale generatoarelor, apare din cauza neidentităţii caracteristicilor magnetice ale transformatoarelor de curent. Prin urmare:

$$I_r = I_{dez}, \tag{11.4}$$

curentul I_r fiind de natura unui curent de magnetizare, cu o importantă componentă aperiodică.

Tot un curent de dezechilibru circulă prin releu şi în cazul unor scurtcircuite exterioare. Pentru ca releul 1 să nu acţioneze greşit în regim normal sau de scurtcircuit exterior, este necesar ca determinarea valorii curentului de pornire I_{pr1} al acestui releu să se efectueze cu o relaţie analoagă cu relaţia (8.18); pentru micşorarea curentului de pornire şi mărirea sensibilităţii se introduc în schemă TSR.

Pentru ca în cazul unei întreruperi în circuitele secundare, de exemplu în punctul B din figura 11.1, să nu fie posibilă o acţionare greşită a protecţiei este necesar ca valoarea curentului de pornire I_{pr1} să fie mai mare decît curentul care circulă prin releul 1 în cazul întreruperii din B. Această valoare a curentului poate fi determinată pornind de la relaţia (11.1) şi neglijînd curentul de dezechilibru din regim normal, deci considerînd că în acest regim are loc relaţia:

$$\underline{I}_r = \underline{I}_{s1} + \underline{I}_{s2} - (\underline{I}_{s3} + \underline{I}_{s4}) \simeq 0, \tag{11.5}$$

deci:

$$\underline{I}_{s1} + \underline{I}_{s2} - \underline{I}_{s4} \simeq \underline{I}_{s3}. \tag{11.6}$$

În cazul întreruperii în B, se anulează curentul I_{s3}:

$$\underline{I}_{s3} = 0, \tag{11.7}$$

și înlocuind această valoare cu relația (11.1) se obține pentru curentul prin releu expresia:

$$\underline{I}_r = I_{s1} + \underline{I}_{s2} - \underline{I}_{s4}. \tag{11.8}$$

Din relațiile (11.6) și (11.8) se obține:

$$\underline{I}_r \simeq \underline{I}_{s3}, \tag{11.9}$$

deci în cazul întreruperii în B curentul prin releu este aproximativ egal cu curentul secundar al transformatorului de curent în circuitul căruia a avut loc întreruperea.

Pentru ca releul *1* să nu acționeze greșit la apariția unei întreruperi, este necesar ca valoarea curentului de pornire să fie stabilită cu ajutorul relației:

$$I_{pr1} = k_{sig} I_{s\,max}, \tag{11.10}$$

în care:

k_{sig} = 1,2 este un coeficient de siguranță supraunitar;

$I_{s\,max}$ — cel mai mare dintre curenții secundari ai transformatoarelor de curent din schemă (în regim de sarcină maximă al liniei pe care se găsește instalat transformatorul respectiv).

În cazul unui scurtcircuit pe bare, de exemplu în punctul K, defectul este alimentat de toate sursele din sistem, deci sensurile convenționale ale curenților $\underline{I}_{p3}$, $\underline{I}_{p4}$, $\underline{I}_{s3}$, $\underline{I}_{s4}$ se schimbă, fiind indicate în figura 11.1 prin săgeți punctate. Se constată că în acest caz rezultă:

$$\underline{I}_r = \underline{I}_{s1} + \underline{I}_{s2} + \underline{I}_{s3} + \underline{I}_{s4}, \tag{11.11}$$

deci prin releul *1* circulă un curent foarte mare, proporțional cu curentul total de scurtcircuit, fiind astfel asigurată acționarea protecției și lichidarea defectului.

Schema trifilară a protecției diferențiale complete se realizează pe două faze, în cazul barelor colectoare din rețele cu curenți mici de punere la pămînt, cînd protecția trebuie să acționeze numai la scurtcircuite între faze (de exemplu, în cazul barelor de 20 kV), și pe trei faze, în cazul barelor din rețele cu curenți mari de punere la pămînt (la tensiuni de 110 kV), cînd protecția trebuie să acționeze și la scurtcircuite monofazate. În schemele trifilare, pe lîngă releele de curent care comandă declanșarea — cum este releul *1* din figura 11.1 — intervin releele de blocaj, care împiedică acționările greșite ale protecției.

Pentru ilustrare, în figura 11.2 este reprezentată schema trifilară a unei protecții diferențiale complete pentru bare colectoare de 110 kV nesecționate, pe lîngă sistemul de bare de serviciu (sistemul *I*) existînd și un sistem de bare de rezervă (sistemul *II*), care poate fi pus în paralel cu primul, prin anclanșarea întrerupătorului de cuplă transversală *ICT*; în scopul simplificării desenului sînt considerate racordate la bare numai două linii — *L-1* și *L-2* — conectate pe sistemul *I*.

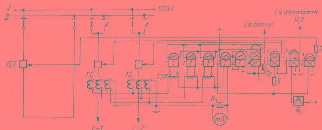


Fig. 11.2. Schema trifilară a protecţiei diferenţiale complete a barelor colectoare.

Analogia dintre realizarea circuitelor diferenţiale în schemele din figurile 11.1 şi 11.2 este pusă în evidenţă dacă schema din figura 11.1 este reprezentată sub forma din figura 11.3.

Toate elementele racordate la bare sînt reprezentate în partea inferioară, iar circuitul diferenţial este format în acelaşi mod (unind între ele bornele dinspre bare ale transformatoarelor de curent *TC* şi bornele dinspre exteriorul zonei protejate, în paralel fiind conectat releul *1*).

În schema trifilară din figura 11.2, cele două grupuri de cîte trei transformatoare de curent au bobinajele secundare legate în stea, cu punctele neutre unite între ele (ceea ce corespunde legăturii din fig. 11.3), iar bornele dinspre exterior ale secundarelor sînt de asemenea — pentru fazele corespunzătoare — legate între ele, fiind astfel formate, împreună cu legătura dintre cele două puncte neutre, circuite diferenţiale analoage cu cele din figurile 8.6 şi 8.7, dar reprezentate în alt mod.

Cele trei relee *1* (v. fig. 11.2) sînt conectate — prin intermediul *TSR* — în derivaţie cu circuitele diferenţiale formate între conductorul care leagă bornele bobinajelor secundare aferente unei anumite faze şi conductorul care leagă între ele punctele neutre (în schemă nu este reprezentat grupul de transformatoare de curent din circuitul cuplei transversale *ICT*, care în anumite cazuri trebuie conectat la circuitul diferenţial). Releele *1* comandă releele intermediare *5* şi *6*, şi deci declanşarea tuturor întrerupătoarelor, inclusiv *ICT*.

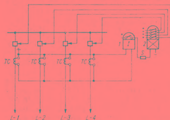


Fig. 11.3. Reprezentarea modificată a schemei din figura 11.1.

Releul de curent *2* acţionează la apariţia unor întreruperi în circuitul secundar — cum este cazul întreruperii din punctul *B* al figurii 11.1 — avînd un curent de pornire foarte redus:

$$I_{pr2} = 0.2 \ldots 1 \text{ A} \quad (11.12)$$

(în cazul cînd curentul secundar al transformatoarelor de curent este de 5A).

Prin acţionarea releului *2* este comandat releul de timp *3* şi după trecerea temporizării t_{a3} are loc acţionarea releului intermediar *4*,

care își comută contactele. Prin deschiderea contactului normal închis se întrerupe plusul la contactele releelor *1*; datorită acestui fapt, chiar dacă releele *1* ar acționa greșit — presupunînd că în perioada întreruperii circuitului secundar ar apărea un scurtcircuit exterior și, prin urmare, curentul care circulă prin bobina releului *1* ar depăși valoarea curentului de pornire stabilit prin relația (11.10) — ele nu pot comanda acționarea releelor *5* și *6*, și deci se evită declanșările greșite, protecția fiind astfel blocată.

Releul *4* se autoreține printr-un contact normal deschis, iar prin celălalt contact normal deschis transmite un semnal personalului de tură, pentru a-l avertiza că a apărut o întrerupere în circuitele secundare, care trebuie imediat remediată. Pentru deblocarea releului *4* trebuie apăsat butonul B_2.

Releul de timp *3* introduce o temporizare t_{a3} în efectuarea blocajului realizat prin acționarea releului *4*, al cărui contact „normal închis" întrerupe plusul la contactele releelor *1*. Această temporizare urmărește ca blocajul să nu se efectueze în cazul scurtcircuitelor pe barele protejate, cînd protecția nu trebuie blocată, și nici în cazul scurtcircuitelor exterioare (cînd releul *2* acționează datorită valorilor maxime ale curenților de dezechilibru), deoarece există pericolul ca unele scurtcircuite exterioare — cum sînt cele provocate de deschiderea separatoarelor sub sarcină — să se extindă la barele colectoare; în asemenea cazuri, pentru a putea lichida defectul este evident necesar ca protecția barelor să nu fie blocată. Aceasta se obține adoptînd pentru temporizarea t_{a3} o valoare superioară celei mai mari temporizări cu care protecțiile de rezervă ale elementelor racordate la bare lichidează defectele exterioare; notînd cu $t_{a\ rez\ max}$ temporizarea menționată, rezultă:

$$t_{a3} = t_{a\ rez\ max} + \Delta t, \qquad (11.13)$$

unde Δt este egal cu 0,5 ... 0,6 s.

Din figura 11.2 se constată că declanșarea întrerupătoarelor liniilor este comandată de releul *5*, iar declanșarea *ICT* este comandată de releul *6*. Această separare are ca scop să permită verificarea stării sistemului de bare de rezervă înainte de închiderea *ICT* și să împiedice ieșirea din funcțiune a sistemului de bare de serviciu în cazul cînd pe sistemul de bare de rezervă ar exista un defect.

Astfel, presupunînd că toate liniile sînt racordate la sistemul *I*, ca în figura 11.2, anclanșarea *ICT* pentru punerea în paralel a ambelor sisteme de bare (operație efectuată relativ frecvent în exploatare) este comandată prin apăsarea butonului B_1 — simbolizînd cheia de comandă — care produce acționarea releului intermediar *7*.

Contactul superior — normal deschis, cu temporizare la deschidere — se închide și comandă anclanșarea *ICT*, rămînînd închis chiar dacă butonul B_1 nu mai este apăsat, avînd în vedere temporizarea la deschidere menționată.

Contactul inferior — normal închis cu temporizare la închidere — se deschide, întrerupînd minusul la bobina releului *5*, deci releul *5* nu mai poate acționa chiar dacă primește comanda de la releele *1*.

În cazul cînd pe sistemul de bare de rezervă există un scurtcircuit care prin închiderea *ICT* este inclus în interiorul zonei protejate de protecția diferențială, acționează releele *1* și comandă releele *5* și *6*, dar numai releul *6* își închide contactele (releul *5* fiind blocat prin releul *7*) și comandă declanșarea *ICT*. În acest mod, defectul de pe sistemul de bare de rezervă este izolat de barele de serviciu și toate elementele racordate la aceste bare rămîn în funcțiune.

Temporizarea la revenire a contactelor releului *7* este astfel calculată, încît revenirea lor să aibă loc numai după ce *ICT* a declanşat şi a separat scurtcircuitul existent pe barele de rezervă.

Butonul B_3 serveşte pentru introducerea în circuit a unui miliampermetru, şuntat în mod normal de acest buton, la care se poate citi valoarea curentului prin bobina releului *2*; în regim normal, prin acest releu circulă curentul de dezechilibru.

Pentru mărirea sensibilităţii protecţiei diferenţiale complete, în afara schemelor cu *TSR* se folosesc şi relee cu bobine de frînare alimentate prin curenţi redresaţi.

Protecţiile diferenţiale complete au avantajul de a satisface condiţiile de rapiditate, selectivitate şi sensibilitate, dar au dezavantajul că impun montarea unor transformatoare de curent cu proprietăţi speciale pe toate elementele racordate la barele protejate, ceea ce, în cazul unui număr mare de elemente, poate mări mult costul protecţiei. Datorită acestui fapt, cum şi schemei complicate protecţiile diferenţiale complete sînt indicate pentru bare colectoare cu tensiunea de 110 şi 220 kV, unde numărul elementelor racordate la bare nu este ridicat.

Protecţiile diferenţiale de tipul menţionat au şi dezavantajul că nu mai funcţionează corect la trecerea unei linii (sau a unui alt circuit) de pe un sistem de bare pe celălalt sistem, întrucît transformatoarele de curent ale liniei respective rămîn conectate în schema protecţiei primului sistem.

C. PROTECŢIA DIFERENŢIALĂ COMPLETĂ, CU RELEE CU ACŢIUNE DE FRÎNARE

În figura 11.4 este reprezentată monofilar schema unei protecţii diferenţiale complete cu relee cu acţiune de frînare prin curenţi redresaţi, prevăzute pentru bare simple de 110 kV. Asemenea variante de protecţii se folosesc şi la instalaţiile cu două sau trei sisteme de bare colectoare şi au avantajul

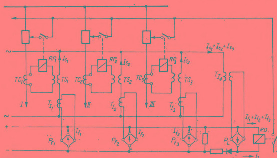


Fig. 11.4. Schema de principiu a protecţiei diferenţiale complete cu relee cu acţiune de frînare pentru un sistem simplu de bare.

că asigură o funcționare selectivă chiar în cazul cînd are loc trecerea unui circuit de pe un sistem de bare pe un alt sistem.

Transformatoarele de curent TC_1, TC_2, TC_3 sînt instalate pe circuitele racordate la bare (circuitele *I*, *II*, *III*) și alimentează în serie bobina releului care asigură protecția circuitului respectiv (RP_1, RP_2, RP_3) și bobinajele primare ale unor transformatoare sumatoare (TS_1, TS_2, TS_3); acestea transformă sistemul trifazat de curenți într-un sistem monofazat, iar bobinajele secundare ale transformatoarelor sumatoare sînt legate în paralel (conform unei scheme diferențiale) și alimentează, prin intermediul transformatoarelor intermediare TI_1, TI_2, TI_3, punțile de frînare P_{F1} P_{F2}, P_{F3}.

În paralel cu secundarele transformatoarelor sumatoare este conectat transformatorul TI_4, care alimentează puntea de lucru P_L; prin bobinajul primar al acestui transformator circulă suma fazorială $\underline{I}_{s1} + \underline{I}_{s2} + \underline{I}_{s3}$ a curenților din bobinajele primare ale transformatoarelor TI_1, TI_2, TI_3 (și totodată din secundarele transformatoarelor TS_1, TS_2, TS_3).

Punțile de frînare debitează curenții redresați I_{f1}, I_{f2}, I_{f3}, a căror sumă circulă prin bobina releului diferențial sensibil *RD*, de tip magnetoelectric. Acest releu compară suma curenților de frînare $I_{f1} + I_{f2} + I_{f3}$ cu curentul de lucru I_l, debitat de puntea de lucru P_L și avînd un sens opus sensului curenților de frînare; schema funcționează deci pe baza unui principiu analog cu cel din figura 9.23 și asigură selectivitatea acționării, comandînd declanșarea întrerupătoarelor numai la defecte în interiorul zonei protejate.

Din schemă se constată că releul *RD* transmite comanda de declanșare a întrerupătoarelor prin contactele releelor RP_1, RP_2, RP_3, care asigură protecția fiecărui circuit racordat la bare. Datorită acestui fapt, schema nu acționează greșit la întreruperi în circuitele secundare ale transformatoarelor de curent, întrucît în absența unui scurtcircuit releele RP_1, RP_2, RP_3 nu-și închid contactele. Ca urmare, nu mai este necesară folosirea relației (11.10) și deci se poate adopta un curent de pornire mai mic, îmbunătățindu-se astfel sensibilitatea protecției.

Schema mai prezintă avantajul că transformatoarele TS_1, TS_2, TS_3 asigură o reducere a curenților debitați de transformatoarele de curent (TC_1, TC_2, TC_3) pînă la valori care permit comutarea circuitelor în care se găsesc secundarele transformatoarelor TS_1, TS_2, TS_3, prin care circulă curenții I_{s1}, I_{s2}, I_{s3}. În stațiile cu mai multe sisteme de bare au loc în exploatare treceri ale unor circuite de pe un sistem pe alt sistem de bare; schema de protecție din figura 11.4 permite ca la trecerea circuitului respectiv un contact auxiliar al separatorului să comande un releu care efectuează și comutarea transformatorului sumator (aferent circuitului menționat) din schema protecției diferențiale a primului sistem de bare în schema protecției diferențiale a celuilalt sistem.

D. PROTECȚIA DIFERENȚIALĂ INCOMPLETĂ

Datorită particularităților arătate mai sus, ale protecției diferențiale complete, pentru barele de tensiune medie (6... 20 kV), cu reactoare pe linii și în circuitele cuplelor longitudinale, se preferă varianta protecției diferențiale incomplete. În această variantă transformatoarele de curent montate pe liniile radiale racordate la bare sînt de tipul obișnuit, ceea ce ieftinește simțitor protecția.

Schema simplificată a unei protecții diferențiale incomplete montată pe una din secțiile barelor colectoare ale unei centrale electrice este reprezentată

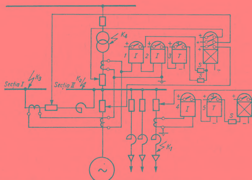


Fig. 11.5. Schema protecției diferențiale incomplete (reprezentată pentru o singură fază) a barelor colectoare.

(pentru o singură fază) în figura 11.5. Transformatoarele de curent cu caracteristici speciale la care se conectează schema protecției diferențiale sînt montate numai în circuitele generatorului, transformatorului și cuplei longitudinale, iar liniile radiale în cablu, care pleacă de la barele protejate, nu sînt incluse în schema protecției diferențiale.

Protecția diferențială rapidă realizată cu releul *1* are rolul de a lichida fără temporizare defectele apărute pe bare, curentul de pornire fiind determinat cu relația:

$$I_{pp1} = K_{sig} I''_{sc\ max\ k_1}, \tag{11.14}$$

în care:

k_{sig} $= 1,2...1,4$;

$I''_{sc\ max\ k_1}$ este valoarea supratranzitorie a curentului de scurtcircuit în regim maxim în punctul K_1, după reactorul liniei radiale.

Ca urmare, protecția *1*, care acționează la defecte pe bare, în K_2, nu poate acționa greșit la defecte exterioare după reactoare, în K_1.

În regim normal, prin releul *1* va circula un curent proporțional cu suma curenților din liniile radiale, care nu sînt cuprinse în circuitul protecției diferențiale. Într-adevăr, se poate presupune că și transformatoarele de curent ale liniilor radiale ar fi legate la schema protecției diferențiale, dar în circuitele secundare ale tuturor acestor transformatoare de curent au apărut întreruperi și se aplică relația (11.9).

Notînd suma acestor curenți, în regim maxim de sarcină, prin $I_{\Sigma\ deriv\ max}$, este necesar ca valoarea curentului de pornire al protecției *1* să satisfacă și relația:

$$I_{pp1} = \frac{k_{sig}}{k_{rev}} I_{\Sigma\ deriv\ max}, \tag{11.15}$$

unde: $k_{sig} = 1,2$ este coeficientul de siguranță;
$k_{rev} = 0,85$ — factorul de revenire.

Ca urmare a condiției (11.15), protecția nu poate acționa greșit sub acțiunea curenților maximi de sarcină din liniile radiale (în absența unui defect pe bare), întrucît rezultă $I_{pp1} > I_{\Sigma\ deriv\ max}$.

Curentul de pornire al protecției *1* trebuie deci să satisfacă atît relația (11.14), cît și relația (11.15), fiind deci adoptată valoarea superioară care rezultă din cele două relații. În practică, relația (11.14) conduce la valori mai mari, acoperitoare și pentru relația (11.15).

Protecția temporizată realizată cu releele *2* și *3* are rolul de a acționa ca rezervă la defecte pe liniile radiale, după reactoare, în cazurile în care protecțiile maximale de curent ale acestor linii (releele *4* și *5*) nu au asigurat lichidarea unor defecte pe linii. Curentul de pornire I_{pp2} al protecției *2* se determină cu relația (11.15) (pentru ca protecția *2* să nu acționeze sub acțiunea curenților maximi de sarcină din liniile radiale), iar temporizarea t_{a3} a releului *3* se alege cu o treaptă mai mare decît temporizarea t_{a5} a releului *5*.

În cazul unor scurtcircuite exterioare în punctele K_3 și K_4 protecțiile barelor nu acționează, întrucît prin releele *1* și *2* circulă numai curenți de dezechilibru (ca la o protecție diferențială completă), care au valori mult mai mici decît curenții de pornire.

REZUMAT

- Cele mai utilizate protecții ale barelor colectoare sînt protecțiile diferențiale.
- Protecții diferențiale ale barelor se realizează în varianta protecțiilor diferențiale complete, pentru bare de 110 kV și mai mult, și a protecțiilor diferențiale incomplete, pentru bare de 6 ... 20 kV.
- În cazul protecției diferențiale complete, schema protecției este realizată cu transformatoare de curent instalate pe toate circuitele racordate la barele protejate. Protecția diferențială completă se realizează cu *TSR* sau cu relee cu acțiune de frînare.
- Protecția diferențială completă cu relee cu acțiune de frînare prin curenți redresați poate conține transformatoare sumatoare care asigură o reducere a curenților debitați de transformatoarele de curent și permit astfel comutarea circuitelor (în care sînt conectate bobinajele secundare ale acestor transformatoare) din schema protecției unui sistem de bare în schema protecției altui sistem. Această comutare este comandată automat de contacte auxiliare ale separatoarelor, la trecerea unui circuit (de exemplu, o linie) de pe un sistem de bare pe alt sistem, fiind asigurată astfel funcționarea selectivă a protecției diferențiale a fiecărui sistem de bare, în condițiile trecerii unor circuite de pe un sistem pe alt sistem de bare.
- Schemele protecțiilor diferențiale complete cu relee cu acțiune de frînare prin curenți redresați mai prezintă și avantajul că nu acționează greșit la apariția unor întreruperi în circuitele secundare ale transformatoarelor de curent.
- Protecțiile diferențiale incomplete necesită mai puține transformatoare de curent cu caracteristici speciale decît protecțiile diferențiale complete (deci au un cost mai redus) și sînt mai simple.
- Protecțiile diferențiale incomplete conțin și un grup de relee care asigură o rezervă pentru protecțiile liniilor radiale.

1. Cum se elimină acționările greșite ale protecției diferențiale complete la apariția unei întreruperi în circuitul secundar al unui transformator de curent?
   a) prin alegerea curentului de pornire în funcție de curentul de scurtcircuit?
   b) prin alegerea curentului de pornire în funcție de cel mai mare curent secundar al transformatoarelor de curent din schemă, în regim de sarcină maximă?
   c) prin introducerea unor blocaje?
2. Prin ce măsură se împiedică declanșarea întrerupătoarelor tuturor circuitelor racordate la un sistem de bare ca urmare a acționării protecției diferențiale complete la închiderea cuplei transversale pe un scurtcircuit pe barele de rezervă?
   a) prin blocarea releului intermediar care comandă declanșarea întrerupătoarelor respective, efectuată la comanda închiderii cuplei?
   b) prin alegerea curenților de pornire?
   c) prin intermediul unor temporizări?
3. Ce elemente din schema protecției diferențiale complete cu relee cu acțiune de frînare (prin curenți redresați) asigură reducerea curenților debitați de transformatoarele de curent și permit comutări în circuitele protecțiilor diferitelor sisteme de bare?
   a) transformatoarele intermediare?
   b) transformatoarele sumatoare?
   c) releele de protecție ale fiecărui circuit racordat la bare, prin ale căror contacte se transmite comanda de declanșare a întrerupătorului?
4. Ce elemente din schema protecției diferențiale complete cu relee cu acțiune de frînare (prin curenți redresați) împiedică acționarea greșită a protecției la apariția unor întreruperi în circuitele secundare ale transformatoarelor de curent?
   a) punțile de frînare?
   b) releele de protecție ale fiecărui circuit racordat la bare, prin ale căror contacte se transmite comanda de declanșare a întrerupătorului?
   c) releul diferențial sensibil?
5. Cum este curentul de pornire al protecției temporizate care asigură rezerva protecțiilor liniilor radiale, în comparație cu curentul de pornire al protecției rapide a barelor, din cadrul schemei protecției diferențiale incomplete?
   a) mai mare?
   b) mai mic?
   c) egal?

CAPITOLUL 12

PROTECȚIA LINIILOR RADIALE

În rețelele radiale, cu linii alimentate de la un singur capăt, se instalează de regulă protecții simple, de tipul protecțiilor maximale de curent temporizate și al secționărilor împotriva scurtcircuitelor între faze și împotriva defectelor monofazate.

A. PROTECȚIA MAXIMALĂ DE CURENT A LINIILOR RADIALE

1. Principii de realizare

Pentru liniile radiale, protecția maximală de curent, prevăzută împotriva scurtcircuitelor între faze, se realizează cu relee de curent și cu relee de timp, selectivitatea fiind asigurată prin introducerea unor temporizări crescătoare de la consumatori spre generatoare. Pot fi realizate protecții cu caracteristică de timp independentă și cu caracteristică de timp limitat dependentă.

● **Protecția maximală de curent cu caracteristică de timp independentă** — pentru o rețea radială — este reprezentată monofilar în schema din figura 12.1, *a*, diagrama temporizărilor fiind reprezentată în figura 12.1, *b*.

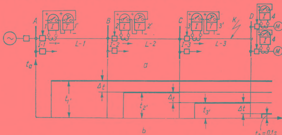


Fig. 12.1. Protecția maximală de curent cu caracteristică de timp independentă pentru o rețea radială:
a — schema monofilară; *b* — diagrama temporizărilor.

Liniile fiind alimentate de la un singur capăt, pentru lichidarea defectelor apărute pe o linie este suficient un singur echipament de protecție, instalat la capătul liniei dinspre sursa de alimentare. De la barele stațiilor *A*, *B* și *C* sînt alimentate alte linii radiale sau consumatori, iar la barele stației *D* sînt racordați consumatori, reprezentați de motoarele electrice *M*.

Consumatorii sînt protejați de releele de curent *4* (în schema monofilară apare numai un singur releu de curent), iar protecția maximală de curent a liniilor este formată din releele de curent *1*, *2*, *3* și din releele de timp *1'*, *2'*, *3'*. Toate releele de curent sînt relee electromagnetice de tip *RC*, care au o caracteristică de timp independentă, deoarece timpul de acționare nu depinde de valoarea curentului care circulă prin bobina releului.

Pentru protecțiile consumatorilor nu sînt necesare temporizări, defectele apărute în motoarele consumatorilor fiind lichidate rapid, intervenind numai timpul propriu al releelor de curent și intermediare. Datorită acestui fapt, în diagrama temporizărilor din figura 12.1, *b* — reprezentînd dependența dintre timpul de acționare t_a al fiecărei protecții și distanța l dintre protecție și defectul apărut — temporizarea t_c a protecției consumatorilor are o valoare redusă, respectiv $t_c \cong 0{,}1$ s.

Pornind de la consumatori spre sursa de alimentare, temporizarea fiecărei protecții trebuie să crească cu cîte o treaptă de timp Δt, rezultînd:

$$\left.\begin{aligned} t_{3'} &= t_c + \Delta t \\ t_{2'} &= t_{3'} + \Delta t \\ t_{1'} &= t_{2'} + \Delta t \end{aligned}\right\}. \qquad (12.1)$$

Prin aceasta se asigură funcționarea selectivă a ansamblului protecțiilor întregii rețele, deoarece în cazul unui scurtcircuit este comandată declanșarea întrerupătorului liniei pe care a apărut scurtcircuitul. Astfel, la un defect în punctul *K* curentul de scurtcircuit (al cărui sens convențional este reprezentat prin săgeți) circulă prin toate transformatoarele de curent care alimentează releele de curent ale protecțiilor liniilor, și deci toate aceste relee pot acționa. Din diagrama temporizărilor se constată însă că releul de timp *3'* își închide contactele înaintea tuturor celorlalte relee de timp, și deci comandă (printr-un releu intermediar care nu este reprezentat în figura 12.1, *a*), declanșarea întrerupătorului *I-3* înainte ca alte relee de timp să-și poată închide contactele.

Prin declanșarea întrerupătorului *I-3*, defectul este lichidat (fiind întreruptă alimentarea punctului *K*), valoarea curenților în rețea scade de la valoarea curentului de scurtcircuit la valoarea corespunzătoare unui regim normal și releele de curent revin în poziția normală; datorită acestui fapt se întrerupe funcționarea mecanismelor releelor de timp *1'* și *2'*, care revin de asemenea în poziția de repaus.

Se constată astfel că liniile *L-1* și *L-2* rămîn în funcțiune, fiind deconectată numai linia defectă *L-3*. Condiția de selectivitate poate fi verificată pentru orice punct de apariție a scurtcircuitului.

Pe lîngă avantajul selectivității și al simplității de realizare, protecția maximală de curent cu caracteristică de timp independentă are dezavantajul obținerii unor temporizări relativ mari pentru protecțiile liniilor apropiate de sursa de alimentare.

În practică se adoptă pentru treapta de temporizare Δt din relațiile (12.1) valoarea:

$$\Delta t = 0{,}5 \ldots 0{,}6 \text{ s}, \qquad (12.2)$$

care asigură funcționarea selectivă a ansamblului protecțiilor rețelei radiale.

Curenții de pornire I_{pp} ai protecțiilor maximale de curent de pe linii se calculează cu o relație analoagă cu cea din expresia (9.4) respectiv.

$$I_{pp} = \frac{K_{sig}}{K_{rev}} I_{sarc\ max}, \tag{12.3}$$

unde $K_{sig} = 1{,}15...1{,}25$ și $K_{rev} = 0{,}85$, iar $I_{sarc\ max}$ este curentul maxim de sarcină prin linia respectivă.

● **Protecția maximală de curent cu caracteristică de timp limitat dependentă** — pentru aceeași rețea radială considerată în figura 12.1, *a* — este reprezentată simplificat (fiind indicat cîte un singur releu pentru fiecare protecție, fără conexiuni și fără transformatoare de curent) în figura 12.2, *a*, iar caracteristica de timp este reprezentată în figura 12.2, *b*.

Protecția motoarelor *M* ale consumatorilor nu se deosebește de cea din figura anterioară, releele *4* fiind relee de curent de tip *RC*. Pentru cele trei linii radiale, protecția se realizează cu relee maximale de curent de tip RT_pC.

Dependența timpului de acționare t_a de distanța *l* dintre locul de defect și locul de instalare al protecției este reprezentată în figura 12.2, *b*, numai pentru elementele de inducție ale releelor RT_pC, făcîndu-se deci abstracție de acțiunea elementelor electromagnetice; acestea din urmă realizează o secționare de curent.

Din figură se constată că pe porțiunea dependentă a caracteristicii, timpul de acționare t_a al elementului de inducție scade cu creșterea curentului, iar pe porțiunea independentă — la valori mari ale curentului — timpul de acționare rămîne constant. Folosind curbele releului RT_pC, pot fi obținute caracteristicile de timp (t_a în funcție de distanța *l*) pentru releele *1*, *2* și *3* din figura 12.2, *a*. Pentru asigurarea selectivității, coordonarea caracteristicilor de timp ale celor trei relee trebuie să se efectueze începînd cu considerarea unui defect în punctul K_1, imediat după locul de instalare al protecției *4* a consumatorului.

Asigurarea unei funcționări selective impune ca lichidarea defectului din K_1 să se facă de către protecția *3*, cu o temporizare mai mare cu Δt decît timpul $t_c \simeq 0{,}1$ s, cu care protecția *4* a consumatorului lichidează același defect. Astfel, protecția *3* poate acționa numai ca protecție de rezervă pentru

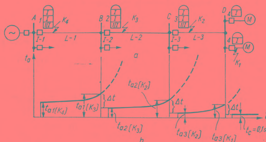


Fig. 12.2. Protecția maximală de curent cu caracteristică de timp limitat-dependentă pentru o rețea radială:

a — reprezentare monofilară (fără indicarea transformatoarelor de curent); *b* — diagrama temporizărilor.

lichidarea unui defect exterior în K_1, în cazul cînd protecția 4 a elementului defect nu a lichidat defectul. Cu notațiile din figura 12.2, *b* rezultă deci:

$$t_{a3\,(K1)} = t_c + \Delta t, \qquad (12.4)$$

unde:

$t_{a3\,(K1)}$ este timpul cu care protecția *3* acționează pentru lichidarea unui defect în K_1;

Δt — treapta de temporizare, cu valoarea din relația (12.2).

Pentru un defect în K_2, imediat după locul de instalare al protecției *3*, lichidarea defectului respectiv se face cu timpul $t_{a3\,(K2)}$. Condiția de selectivitate impune pentru temporizarea $t_{a2\,(K2)}$ — cu care protecția *2* poate lichida, ca protecție de rezervă, defectul din K_2, în cazul cînd protecția *3* nu a asigurat această lichidare — o valoare determinată de relația:

$$t_{a2\,(K2)} = t_{a3\,(K2)} + \Delta t. \qquad (12.5)$$

La fel se obține și variația temporizării protecției *1*, atunci cînd defectul se deplasează din K_3 în K_4. Prelungind caracteristicile trasate pentru protecțiile rețelei radiale (aceste prelungiri sînt reprezentate cu linie întreruptă) se obține imaginea generală a temporizărilor cu care sînt lichidate defectele.

Curenții de pornire pentru protecțiile maximale de curent cu caracteristică de timp limitat dependentă se stabilesc tot cu ajutorul relației (12.3), folosită și la protecțiile maximale cu caracteristică independentă.

Comparînd caracteristicile de timp din figurile 12.1, *b* și 12,2, *b*, se constată că prin folosirea protecțiilor cu caracteristici limitat dependente se obțin temporizări mai mici în apropierea sursei. Aceste protecții au însă dezavantajul că timpul de lichidare a defectelor depinde de o serie de factori, cum sînt, de exemplu, valoarea rezistenței arcului și regimul de funcționare al rețelei. Datorită acestui fapt, în practică sînt preferate protecțiile maximale de curent cu caracteristică de timp independentă.

2. Scheme trifilare ale protecțiilor maximale de curent, realizate cu curent operativ continuu

Transformatoarele de curent care alimentează releele protecției maximale de curent se instalează pe două faze, deoarece la scurtcircuitele între faze are loc o creștere a curentului prin cel puțin unul din transformatoare, deci protecția sesizează apariția defectului.

În figura 12.3 este reprezentată schema trifilară a unei protecții maximale de curent cu caracteristică independentă; releele de curent *1* sînt alimentate de transformatoarele de curent *TC* și comandă releul de timp *2*, care — după trecerea temporizării fixate — transmite comanda de acționare releului intermediar *3*. Contactul acestui releu se închide și stabilește curentul prin bobina de declanșare *BD* a întrerupătorului care comandă declanșarea acestuia. Între releele *2* și *3* este conectat releul de semnalizare serie *S*.

Dacă linia radială protejată alimentează un transformator coborîtor cu conexiunea stea-triunghi, la anumite scurtcircuite exterioare (apărute după conexiunea stea-triunghi a transformatorului), la care protecția maximală de curent a liniei trebuie să acționeze ca protecție de rezervă, curentul prin cele două faze pe care sînt instalate transformatoarele de curent poate fi de două ori mai mic decît curentul din faza fără transformator de curent. În acest

caz, coeficientul de sensibilitate al protecției maximale este de două ori mai mic decît în cazul în care protecția ar fi fost realizată cu trei transformatoare de curent și cu trei relee de curent. Această situație a fost reprezentată în figura 9.5.

În cazurile în care schema din figura 12.3 nu asigură valoarea prescrisă pentru coeficientul de sensibilitate se folosește schema din figura 12.4, analoagă cu cea din figura 9.6. Această schemă — conform diagramei fazoriale din figura 9.6 — asigură aceeași sensibilitate ca și o schemă cu trei transformatoare de curent și trei relee de curent, avînd însă un transformator mai puțin.

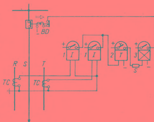


Fig. 12.3. Schema trifilară a unei protecții maximale de curent cu caracteristică de timp independentă, folosind curent operativ continuu (varianta cu două transformatoare de curent și cu două relee de curent).

Pentru mărirea sensibilității se folosesc și protecții cu relee — filtru de curent de componentă simetrică inversă, cum este releul *FRC — 2a*, fabricat la ICEMENERG.

În figura 12.5 este reprezentată schema trifilară a unei protecții maximale de curent cu caracteristică limitat dependentă. Întrucît releele *1*, de tip *RTpC*, asigură și obținerea temporizărilor necesare, în schemă nu mai apare un releu de timp, cum era releul de timp *2* în schema din figura 12.3. În cazul în care contactele releelor *RTpC* pot suporta curentul bobinei de declanșare, nu mai este necesar releul intermediar *2*.

Dacă în locul de instalare al protecției maximale de curent se găsesc baterii de acumulatoare pentru furnizarea curentului continuu, schemele se realizează cu curent operativ continuu. În celelalte cazuri, de exemplu în stații de importanță redusă, care nu sînt prevăzute cu baterii de acumulatoare, se utilizează scheme realizate cu curent operativ alternativ sau cu curent operativ redresat.

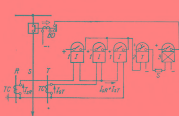


Fig. 12.4. Schema trifilară a unei protecții maximale de curent cu caracteristică de timp independentă folosind curent operativ continuu (varianta cu două transformatoare de curent și trei relee de curent).

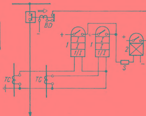


Fig. 12.5. Schema trifilară a unei protecții maximale de curent cu caracteristică de timp limitat-dependentă, folosind curent operativ continuu.

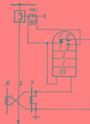


Fig. 12.6. Schema trifilară a unei protecții maximale de curent cu curent operativ alternativ.

3. Scheme trifilare ale protecţiilor maximale de curent realizate cu curent operativ alternativ sau redresat

La noi în ţară se fabrică, la ICEMENERG, relee cu ajutorul cărora pot fi realizate protecţii maximale de curent funcţionînd cu curent operativ alternativ: releul de curent *DPCA* (dispozitiv de protecţie cu curent alternativ), obţinut din releul *RTpC* printr-o modificare a contactelor.

În figura 12.6 este ilustrată folosirea releului *DPCA* pentru protecţia unei linii radiale; pentru descrierea funcţionării contactele releului au fost notate cu *1*, *1'*, *2* şi *2'*. Transformatoarele de curent de pe fazele *R* şi *T* alimentează bobina releului cu un curent $\underline{I}_r$ definit de relaţia:

$$\underline{I}_r = \underline{I}_{sR} - \underline{I}_{sT}. \tag{12.6}$$

În regim normal de funcţionare a liniei protejate, circuitul bobinei este stabilit de contactul *1-1'* normal închis.

Din diagrama fazorială reprezentată în figura 12.7 se constată că între modulele fazorilor din expresia (12.6) există relaţia:

$$I_r = \sqrt{3} I_{sR} = \sqrt{3} I_{sT}, \tag{12.7}$$

deci valoarea curentului I_r este mai mare decît valoarea curentului secundar al transformatoarelor de curent, datorită conexiunii dintre bobinajele secundare ale acestor transformatoare.

În cazul apariţiei unui scurtcircuit pe linia protejată, creşterea curentului prin bobina releului provoacă punerea în mişcare a discului şi ridicarea sectorului dinţat. O piesă metalică antrenată de sector ridică contactul *2* şi acesta apasă contactul *2'*, iar apoi — sectorul continuînd să se ridice — lamela cu contactele *1'* şi *2'* este împinsă în sus, contactele *1* şi *1'* deschizîndu-se.

În această situaţie, transformatoarele de curent alimentează în serie bobina releului şi bobina de declanşare *BD* (prin contactele închise *2*, *2'*, contactele *1—1'* fiind deschise): întrerupătorul declanşează.

Se constată astfel că în regim normal de funcţionare a liniei, transformatoarele de curent alimentează numai bobina releului, bobina de declanşare *BD* fiind scoasă din circuit datorită faptului că sînt deschise contactele *2—2'*. La un scurtcircuit, releul acţionează închizînd contactele *2—2'* şi deschizînd apoi contactele *1—1'*, bobina de declanşare *BD* fiind alimentată (în serie cu bobina releului) de transformatoarele de curent.

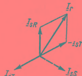


Fig. 12.7. Diagrama fazorială pentru determinarea curentului prin bobina releului din figura 12.6.

Închiderea contactelor *2—2'* înaintea întreruperii contactelor *1—1'* este necesară pentru ca circuitele secundare ale transformatoarelor de curent să nu rămînă deschise, fapt care — după cum se ştie — nu este permis.

În schemele protecţiei maximale cu curent operativ alternativ, energia necesară bobinei de declanşare *BD* este furnizată de transformatoarele de curent ale protecţiei. Pentru a suporta curentul necesar bobinei de declanşare, contactele releelor *DPCA* — prin intermediul cărora se efectuează comutările menţionate — sînt

dimensionate pentru a putea conduce un curent de 150 A timp de 10 s.

Tot la ICEMENERG se fabrică dispozitive pentru protecții maximale de curent funcționînd cu curent operativ redresat, cum este blocul *BACC* (bloc de alimentare cu curent continuu). Acest bloc reprezintă o sursă de alimentare cu curent alternativ redresat, curentul alternativ fiind furnizat de transformatoarele de curent și de tensiune.

În figura 12.8 este reprezentată schema unui bloc *BACC*. Punțile de redresare dublă alternanță P_1, P_2, P_3, realizate cu diode semiconductoare, sînt alimentate prin intermediul transformatoarelor Tr_1, Tr_2, Tr_3 de la barele de tensiune, care sînt alimentate de transformatorul de tensiune. După cum se constată din schemă, punțile redresoare P_1, P_2, P_3 pot fi alimentate cu tensiuni proporționale cu tensiunile între faze (reprezentarea prin linii continue a alimentării bobinajelor primare ale transformatoarelor Tr_1, Tr_2, Tr_3) sau cu tensiuni proporționale cu tensiunile pe fază (reprezentarea prin linii întrerupte).

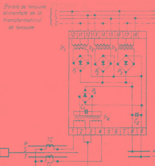


Fig. 12.8. Schema blocului *BACC*.

Puntea de redresare P_4 este alimentată de la transformatoarele de curent *TC* prin intermediul transformatorului Tr_4, care are două bobinaje primare; pe lîngă conexiunea indicată în figura 12.8, cele două bobinaje primare pot fi legate și în serie, fiind alimentate cu diferența fazorială a curenților secundari ai celor două transformatoare de curent (soluție analoagă cu cea din fig. 12.6). Condensatorul C_1 stabilizează tensiunea secundară a transformatorului Tr_4.

Toate cele patru punți de redresare sînt legate în paralel pe partea curentului redresat, obținîndu-se la bornele de ieșire (bornele *8* și *9*) curentul redresat necesar alimentării releelor din schema protecției maximale de curent. Condensatorul C_2 are rolul de aplatisare a tensiunii redresate de blocul *BACC*, variația în timp a tensiunii redresate fiind mai apropiată de cea a tensiunii continue.

Într-o variantă mai recentă, blocul *BACC* este realizat cu o singură punte de redresare în circuitul de tensiune.

Un alt dispozitiv care acumulează energie pentru a o furniza bobinei de declanșare a întrerupătorului — atunci cînd schema de protecție transmite comanda de declanșare — este blocul *DCA* (dispozitiv de curent alternativ), fabricat de asemenea la ICEMENERG. Acest bloc are condensatoare care, în regim normal de funcționare a liniei protejate, se încarcă prin intermediul unui transformator al unei punți de redresare. Cînd schema de protecție transmite comanda de declanșare, condensatoarele se descarcă prin bobina de declanșare a întrerupătorului, circuitul de descărcare fiind stabilit de unul din contactele releelor din schemă.

B. PROTECȚIA MAXIMALĂ HOMOPOLARĂ A LINIILOR RADIALE

1. Principii de realizare

După cum s-a menționat și la protecția generatoarelor (cap. 8), orice defect în care are loc un contact între o fază și pămînt este însoțit de apariția componentei de secvență homopolară a tensiunii și a curentului. Datorită acestui fapt, împotriva defectelor monofazate (puneri la pămînt, în rețelele cu curenți mici de punere la pămînt, și scurtcircuite monofazate, în rețelele cu curenți mari de punere la pămînt) se utilizează protecții homopolare, respectiv protecții care controlează valoarea componentei homopolare I_0 a curentului și care acționează la depășirea valorii de pornire stabilite.

Modul de obținere a unui curent proporțional cu componenta de secvență homopolară este descris în capitolul 8, la protecția generatoarelor; pentru protecția homopolară a liniilor se utilizează de asemenea *FCSH* și *TSH*.

În schema protecției maximale homopolare cu *FCSH* sau cu *TSH*, acestea alimentează un releu maximal de curent, care comandă un releu de timp; după trecerea temporizării reglate, releul de timp își închide contactul și comandă releul de ieșire. În funcție de tipul rețelei din care face parte linia protejată, releul de ieșire este fie un releu intermediar, care transmite comanda de declanșare a întrerupătorului, fie un releu de semnalizare, care avertizează personalul de tură.

Astfel, în cazul unor linii radiale din rețele cu curenți mari de punere la pămînt, cum sînt liniile de 110 kV — unde un defect la pămînt reprezintă un scurtcircuit monofazat — se prevede un releu intermediar de ieșire care comandă declanșarea întrerupătorului, după cum rezultă și din schema reprezentată în figura 12.9. La linii radiale din rețele cu curenți mici de punere la pămînt, cum sînt liniile de 6—20 kV — unde un defect monofazat înseamnă o punere la pămînt, care nu prezintă un pericol imediat — releul de curent, după cum rezultă și din schema reprezentată în figura 12.11, comandă numai o semnalizare.

Liniile de 110 kV sînt de regulă prevăzute cu protecții de distanță (v. cap. 14); întrucît majoritatea tipurilor de protecții de distanță acționează și la scurtcircuite monofazate, protecția maximală homopolară se mai montează numai cînd este indicat să existe o protecție de rezervă suplimentară (protecția de rezervă a unei linii este asigurată de protecțiile de distanță de pe liniile vecine).

În rețelele cu curenți mici de punere la pămînt (de tensiuni cuprinse între 6 și 20 kV), curenții de defect au valori foarte reduse, datorită impedanței mari a circuitului prin care circulă acești curenți.

În cazul rețelelor de la tensiunea generatoarelor funcționînd cu neutrul izolat, curenții de punere monofazată la pămînt circulă prin capacitatea rețelei în raport cu pămîntul; această capacitate reprezintă o impedanță de valoare ridicată și, ca urmare, curenții capacitivi respectivi sînt foarte mici (situația prezintă analogii cu cea expusă în cap. 8, la protecția generatoarelor împotriva punerilor la pămînt în stator). Punerea monofazată la pămînt prezintă însă pericole în cazul unei funcționări îndelungate în acest regim și de aceea protecția trebuie să transmită o semnalizare la apariția defectului, pentru ca personalul de tură să ia măsuri.

Astfel, în primul rînd, faza pusă la pămînt capătă potențialul nul al pămîntului, iar tensiunile fazelor sănătoase cresc de $\sqrt{3}$ ori, ceea ce determină suprasolicitări ale izolației acestor faze.

În al doilea rînd, aceste suprasolicitări măresc probabilitatea străpungerii izolației unei alte faze, și deci a transformării defectului monofazat într-un scurtcircuit bifazat prin pămînt (denumit și dublă punere la pămînt), care prezintă toate pericolele caracteristice scurtcircuitelor.

În cazul rețelelor compensate, cu neutrul legat la pămînt prin bobină de stingere, are loc compensarea componentelor capacitive ale curentului de punere la pămînt monofazată, rezultînd pentru acest curent valori foarte mici.

Ca urmare, protecțiile realizate numai cu *FCSH* sau *TSH* nu pot asigura selectivitatea, întrucît curentul de punere la pămînt care circulă prin linia defectă este mai mic decît curentul capacitiv care circulă prin alte linii din aceeași rețea (curent care se închide prin capacitățile liniilor în raport cu pămîntul); realizarea unei protecții selective pe baza valorii curentului de punere la pămînt nu mai este astfel posibilă.

De aceea, pentru protecția liniilor de 6—20 kV împotriva punerilor la pămînt monofazate au fost elaborate alte principii. Unul dintre aceste principii se bazează pe faptul că pe linia defectă amplitudinile armonicilor superioare conținute în curentul de defect sînt mult mai mari decît cele ale armonicilor superioare conținute în curenții de defect care circulă prin celelalte linii.

Avînd în vedere această diferență importantă, la ICEMENERG au fost elaborate și sînt produse indicatoare selective de puneri la pămînt (*ISP*) și relee de protecție selectivă împotriva punerilor la pămînt (*RPP*) din rețele cu neutrul izolat sau compensat, care selectează linia defectă după conținutul armonicilor superioare în curenții homopolari. Alimentarea releelor *RPP* poate fi făcută de la *TSH* sau de la *FCSH*.

Tot la ICEMENERG a fost elaborat și este fabricat un releu electronic direcțional de procese tranzitorii *R.D.T.*, care acționează în timpul regimului tranzitoriu al punerilor la pămînt monofazate pe linii cu neutrul izolat sau compensat.

Acest releu controlează defazajul dintre tensiunea homopolară $\underline{U}_0$ și curentul homopolar $\underline{I}_0$ în prima semiperioadă a regimului tranzitoriu, acționînd în funcție de valoarea acestui defazaj și asigurînd o sensibilitate foarte ridicată.

2. Scheme trifilare

Schema trifilară din figura 12.9 ilustrează realizarea unei protecții maximale homopolare pentru o linie radială de 110 kV, *FCSH* alimentînd releul de curent *1*, care comandă releul de timp *2*; după trecerea temporizării t_{a2}, releul *2* determină acționarea releului intermediar *3* și acesta comandă declanșarea întrerupătorului.

Pentru ca releul *1* să nu acționeze greșit, ca urmare a curenților de dezechilibru, curentul de pornire I_{pr1} se calculează cu o relație de forma expresiei (8.32). Temporizarea t_{a2} se determină folosind tot principiul creșterii temporizărilor în trepte de la consumatori spre sursă, ca și la protecția maximală de curent împotriva scurtcircuitelor între faze. La stabilirea temporizărilor crescătoare în trepte trebuie însă să se considere numai elementele legate galvanic de linia protejată (deci numai elementele din rețeaua de 110 kV), ceea ce conduce la temporizări mai mici decît în cazul protecțiilor maximale împotriva scurtcircuitelor între faze, unde pentru stabilirea temporizărilor sînt consi-

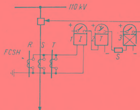


Fig. 12.9. Schema trifilară a protecţiei maximale homopolare pentru o linie radială dintr-o reţea cu curenţi mari de punere la pămînt.

derate şi elementele cuplate magnetic — prin transformatoare — cu linia protejată.

Din figura 12.9 rezultă că pentru *FCSH* protecţia maximală homopolară necesită trei transformatoare de curent, ceea ce conduce la un cost ridicat. O soluţie mult mai ieftină se obţine dacă se utilizează aceleaşi transformatoare de curent pentru a alimenta atît protecţia maximală de curent împotriva scurtcircuitelor între faze, cît şi protecţia maximală homopolară. Schema corespunzătoare acestei soluţii este reprezentată în figura 12.10.

Releele *1* şi *1'* formează protecţia maximală de curent împotriva scurtcircuitelor între faze, instalată pe fazele *R* şi *T*. Montînd un transformator de curent şi pe faza *S* şi legînd la un punct comun borna bobinajului secundar al acestui transformator cu conductoarele de ieşire din bobinele celor două relee *1*, bornele *A* şi *B* astfel obţinute reprezintă bornele de ieşire ale *FCSH*. Acest lucru se verifică imediat, constatînd că la bornele *A* şi *B* sînt legate în paralel bobinajele secundare ale celor trei transformatoare de curent.

Ca urmare, releul *2* — alimentat de *FCSH* — şi releul *2'* formează o protecţie maximală homopolară, releul intermediar de ieşire *3* fiind comun.

Schema din figura 12.11 ilustrează realizarea unei protecţii maximale homopolare pentru o linie radială de 6—20 kV. Cablul liniei trece prin interiorul miezului *TSH*, iar bobinajul secundar al *TSH* alimentează releul de curent *1*, care transmite o semnalizare în cazul apariţiei unei puneri la pămînt pe linie.

Cutia terminală a cablului este izolată faţă de construcţie şi este legată la pămînt printr-un conductor care trece tot prin interiorul miezului *TSH*, ca şi în figura 8.15, *b*.

La un număr redus de linii radiale racordate la bare de 6—20 kV se poate instala pe barele colectoare un singur dispozitiv de control al izolaţiei (de exemplu, cu 3 voltmetre), fără să se mai prevadă protecţii homopolare pe fiecare linie. La apariţia unei puneri la pămînt pe una din linii, dispozitivul de control al izolaţiei transmite o semnalizare, avertizînd personalul de tură;

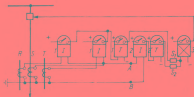


Fig. 12.10. Folosirea transformatoarelor de curent ale altor protecţii pentru alimentarea protecţiei maximale homopolare.

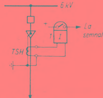


Fig. 12.11. Schema trifilară a protecţiei maximale homopolare pentru o linie radială dintr-o reţea cu curenţi mici de punere la pămînt.

acesta deconectează pe rînd fiecare linie și la anularea semnalizării identifică linia defectă.

Aceste operații sînt contraindicate pentru barele cu multe linii de plecare, deoarece conduc la numeroase deconectări, și deci la întreruperi în alimentarea consumatorilor.

C. SECȚIONAREA DE CURENT ÎMPOTRIVA SCURTCIRCUITELOR ÎNTRE FAZE

1. Principii de realizare

Pentru protecția rapidă a liniilor radiale împotriva scurtcircuitelor între faze se utilizează secționarea de curent, realizată pe baza acelorași principii ca și la transformatoare: releele de curent ale secționării — conectate la transformatoare de curent instalate la capătul liniei dinspre alimentare — comandă direct, fără temporizare, releul intermediar de ieșire și declanșarea întreruptorului. Întrucît nu sînt introduse temporizări, selectivitatea se asigură prin alegerea corespunzătoare a curentului de pornire, fiind utilizată o relație analoagă cu (8.22) și (9.30).

În figura 12.12, *a* este reprezentat simplificat, pentru o singură fază, modul de realizare a secționării de curent, iar în figura 12.12, *b* sînt trasate curbele de variație a curenților de scurtcircuit (în regim maxim și minim de funcționare a liniei protejate), în funcție de distanța l dintre defect și locul de instalare a protecției.

Pentru ca protecția *1* să nu acționeze neselectiv la defecte exterioare este necesar să se adopte un curent de pornire I_{pp1} mai mare decît valoarea maximă posibilă a curentului de scurtcircuit care poate apărea la un defect exterior, rezultînd astfel relația:

$$I_{pp1} = K_{sig} I_{sc\ max\ K1}, \tag{12.8}$$

în care:

K_{sig} = 1,2...1,3, cînd se folosesc relee *RC*;

K_{sig} = 1,4...1,5, cînd sînt utilizate releele *RTpC*, la care secționarea este realizată prin intermediul elementului electromagnetic;

$I_{sc\ max\ K1}$ este valoarea supratranzitorie a componentei periodice a curentului de scurtcircuit în cazul unui defect în K_1 apărut în regim maxim.

Punctul K_1 fiind cel mai apropiat punct exterior liniei protejate, curentul $I_{sc\ max\ K1}$ reprezintă valoarea maximă posibilă pentru un curent de scurtcircuit exterior, întrucît la defecte exterioare mai depărtate curentul de scurtcircuit se micșorează.

Reprezentînd în figura 12.12, *b* orizontala corespunzătoare valorii curentului de pornire I_{pp1}, se constată că intersecțiile acestei orizontale cu curbele de variație a curenților de scurtcircuit determină pe linia protejată delimitarea unor zone de acționare și a unor zone moarte pentru protecția *1*.

Astfel, pentru regimul maxim de funcționare punctul C' de intersecție (corespunzător pe linia protejată punctului C din fig. 12.12, *a*) delimitează zona de acționare de lungime l_{za} — cuprinsă între punctele A și C ale liniei —

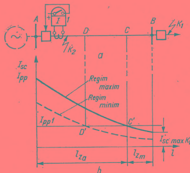


Fig. 12.12. Secționarea de curent pentru linii radiale: *a* — schema monofilară simplificată; *b* — diagramele de variație a curenților de scurtcircuit.

și zona moartă de lungime l_{zm} cuprinsă între punctele *C* și *B* ale liniei. Pentru defecte apărute în regim maxim între punctele *A* și *C*, curentul de defect este mai mare decît curentul de pornire I_{pp1} și protecția *1* acționează, iar pentru defecte care apar între *C* și *B* curentul de defect este mai mic decît curentul de pornire I_{pp1} și protecția *1* nu acționează.

În mod analog, punctul de intersecție *D'* (corespunzător punctului *D* pe linie) delimitează o zonă de acționare *AD* și o zonă moartă *DB* pentru regimul minim de funcționare; lungimile acestor zone nu mai sînt marcate în figura 12.12, *b*. Se constată că în regimul minim rezultă o zonă moartă de lungime mai mare decît în regimul maxim.

Secționarea de curent este folosită împreună cu protecția maximală de curent, care asigură lichidarea defectelor din zona moartă și poate acționa ca rezervă pentru lichidarea unui defect din zona de acționare a secționării, în cazurile în care secționarea are un refuz de funcționare și nu asigură lichidarea defectului respectiv.

În unele cazuri se folosesc secționări de curent în două trepte, cu o treaptă rapidă și o treaptă temporizată.

2. Scheme trifilare ale secționării de curent împotriva scurtcircuitelor între faze

Fiind o protecție împotriva scurtcircuitelor între faze, secționarea se instalează pe două faze (necesitînd două transformatoare de curent și două relee), întrucît la orice tip de scurtcircuit între faze este afectată cel puțin una dintre fazele prevăzute cu transformator de curent.

Pentru economie de transformatoare de curent, releele secționării sînt alimentate de aceleași transformatoare de curent care alimentează și releele de curent ale protecției maximale împotriva scurtcircuitelor între faze, rezultînd schema din figura 12.13. Releele de curent *1* reprezintă secționarea de curent și comandă direct releul intermediar de ieșire *4*, iar releele de curent *2* și releul de timp *3* formează protecția maximală de curent.

În schema din figura 12.13 este reprezentată o variantă cu curent operativ continuu pentru realizarea secționării și a protecției maximale, fiind folosite relee de curent de tip *RC* pentru cele două protecții; în acest caz, protecția maximală de curent are o caracteristică de timp independentă.

Dacă se folosesc relee de tip *RTpC*, atunci cu două relee se realizează ambele protecții, elementul de inducție reprezentînd o protecție maximală de curent

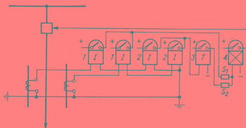


Fig. 12.13. Schema trifilară a secționării de curent.

cu caracteristică limitat dependentă, iar elementul electromagnetic realizînd secționarea; în locul schemei din figura 12.13 se obține schema din figura 12.5, în care sînt concentrate cele două protecții.

În alte variante, schemele secționării de curent sînt realizate cu curent operativ alternativ sau redresat.

D. SECȚIONAREA HOMOPOLARĂ

1. Principii de realizare

Împotriva scurtcircuitelor monofazate — deci împotriva defectelor monofazate de pe linii radiale cu tensiunea de 110 kV și mai mult — poate fi utilizată o secționare homopolară, funcționînd pe principii analoage cu cele menționate la secționarea de curent.

Astfel, pentru determinarea curentului de pornire al secționării homopolare se trasează curbe care reprezintă grafic dependența dintre curentul de scurtcircuit monofazat (în regim maxim și minim) și distanța l dintre defect și locul de instalare a protecției, rezultînd un aspect asemănător cu cel al curbelor din figura 12.12.

Pentru curentul de pornire al secționării homopolare se adoptă apoi o valoare superioară celui mai mare curent de scurtcircuit monofazat care poate apărea la un defect monofazat exterior, conform unei relații analoage cu (12.8), fiind astfel asigurată selectivitatea.

Scurtcircuitele monofazate apărute în zona moartă a secționării homopolare sînt lichidate de protecția maximală homopolară a liniei.

2. Scheme trifilare

Secționarea homopolară, ca și protecția maximală homopolară, necesită un filtru *FCSH*, pentru a sesiza apariția unui defect monofazat.

În scopul unei cît mai mari economii de transformatoare de curent se recomandă ca toate cele patru protecții menționate în capitolul 12 (protecția

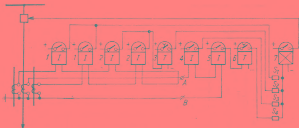


Fig. 12.14. Schema ansamblului protecţiilor unei linii radiale.

maximală de curent şi secţionarea de curent — împotriva scurtcircuitelor între faze, şi protecţia maximală homopolară şi secţionarea homopolară — împotriva scurtcircuitelor monofazate) să fie alimentate de un singur grup de trei transformatoare de curent. În acest caz, în varianta folosirii curentului operativ continuu rezultă schema trifilară din figura 12.14.

Secţionarea de curent (releele de curent *1*) şi protecţia maximală de curent (releele de curent *2* şi releul de timp *3*) sînt instalate pe două faze; folosind şi al treilea transformator de curent, la bornele *A* şi *B* se obţine conectarea în paralel a bobinajelor secundare ale celor trei transformatoare de curent (ca şi în fig. 12.10), deci releele de curent *4* şi *5* sînt de fapt alimentate de un filtru *FCSH*. Releul de curent *4* reprezintă secţionarea homopolară, iar releul de curent *5* şi releul de timp *6* realizează protecţia maximală homopolară. Toate cele patru protecţii comandă releul intermediar de ieşire *7*.

Varianta din figura 12.14 este folosită la linii radiale de tensiuni 110—220 kV la care transformatoarele de curent au cel puţin trei înfăşurări secundare, din care două sînt destinate protecţiei; se recomandă repartizarea celor patru protecţii din schemă pe cele două înfăşurări menţionate ale transformatoarelor de curent. Protecţiile temporizate pot comanda declanşarea şi direct prin releele de timp, rezultînd o creştere a siguranţei schemei, cu condiţia ca contactele acestor relee să poată stabili şi suporta curentul bobinelor de declanşare ale întrerupătoarelor.

Secţionarea homopolară poate fi realizată şi în varianta cu curent operativ alternativ sau redresat în schemă comună cu secţionarea de curent.

E. PROTECŢIA BLOCURILOR LINIE-TRANSFORMATOR

O schemă utilizată frecvent este schema bloc linie-transformator (fig. 12.15), în care nu se instalează întrerupător între linie şi transformator, deci un defect pe linie sau în transformator determină ieşirea din funcţiune a ambelor elemente ale blocului.

În prezent, schema bloc linie-transformator este folosită îndeosebi în varianta staţiilor cu racord adînc, în care dintr-o staţie de 110 kV a sistemului electric pleacă o linie radială de cîţiva kilometri, care alimentează un con-



Fig. 12.15. Schema blocului linie-transformator.

sumator industrial important printr-un transformator coborîtor, de exemplu de 110/6 kV.

În acest caz, blocul linie transformator este echipat cu protecții simple, instalate în stația de 110 kV (protecție maximală de curent, secționare de curent, protecție homopolară), iar transformatorul *Tr* este prevăzut cu o protecție diferențială longitudinală și cu o protecție de gaze, care transmit printr-un cablu pilot o comandă de declanșare întrerupătorului *I-1* al liniei *L* (fig. 12.15), din stația de 110 kV.

Secționarea de curent poate fi realizată astfel încît să acopere întreaga lungime a liniei *L* și o parte a bobinajului transformatorului *Tr*, curentul de pornire I_{pp} al secționării (instalată la capătul liniei cu întrerupătorul *I-1*) calculîndu-se în funcție de valoarea $I_{sc\ max\ K}$ a curentului de scurtcircuit în regim maxim în punctul *K*, după transformatorul *Tr*.

În figura 12.16 este reprezentată variația curentului de scurtcircuit în regim maxim $I_{sc\ max}$ în funcție de distanța l dintre defect și întrerupătorul *I-1*, unde sînt montate transformatoarele de curent care alimentează secționarea de curent.

Întrucît transformatorul *Tr* reprezintă o impedanță concentrată, variația curentului de scurtcircuit este mai abruptă în porțiunea corespunzătoare deplasării defectului de-a lungul bobinajelor transformatorului. Din figura 12.16 se constată că stabilind curentul de pornire I_{pp} al secționării de curent cu relația:

$$I_{pp} = k_{sig} I_{sc\ max\ k} \tag{12.9}$$

(unde k_{sig} este coeficientul de siguranță supraunitar), se obține o zonă de acționare de lungime l_{za}, care acoperă în întregime linia *L* și o parte a bobinajelor transformatorului *Tr*, iar zona moartă are o lungime l_{zm} redusă; delimitarea celor două zone este marcată de punctul *A*, de intersecție a curbei $I_{sc\ max}$ cu orizontala I_{pp}.

Se constată astfel că protecțiile blocurilor linie-transformator în varianta stațiilor cu racord adînc se caracterizează prin simplitatea soluțiilor, singurul element care ridică costul protecției fiind cablul pilot prin care protecțiile transformatorului (protecția diferențială și protecția de gaze) transmit la distanță comanda de declanșare întrerupătorului *I-1*.

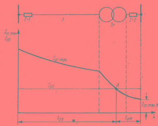


Fig. 12.16. Variația curentului de scurtcircuit în funcție de distanța pînă la defect.

● Pentru asigurarea selectivității, temporizările protecției maximale de curent a liniilor radiale trebuie să crească de la consumatori spre sursă.

● La liniile care alimentează transformatoare cu conexiuni stea-triunghi, schemele cu două transformatoare de curent și trei relee pot asigura (pentru anumite defecte) o sensibilitate de două ori mai ridicată decît schemele cu două transformatoare de curent și două relee.

● Alimentarea cu curent operativ alternativ a schemelor protecțiilor maximale de curent se poate realiza fie direct de la transformatoarele de curent care alimentează protecția, fie prin intermediul unor punți de redresare, fie prin intermediul unor condensatoare încărcate prin transformatoare intermediare și punți de redresare.

● Protecția temporizată a liniilor cu curenți mari de punere la pămînt împotriva scurtcircuitelor monofazate se realizează ca protecție maximală homopolară. Protecția liniilor cu curenți mici de punere la pămînt împotriva punerilor la pămînt monofazate se poate realiza prin intermediul unei protecții maximale homopolare, prin controlul conținutului de armonici superioare în curentul homopolar (releele *RPP*) sau prin controlul defazajului dintre tensiunea homopolară U_0 și curentul homopolar I_0 în prima semiperioadă a regimului tranzitoriu (releul *RDT*).

● Selectivitatea secționării de curent, prevazută împotriva scurtcircuitelor între faze pe liniile radiale, se asigură prin alegerea curentului de pornire în funcție de curentul maxim de scurtcircuit exterior.

● Defectele apărute în zonele moarte ale secționării de curent sînt lichidate de protecția maximală de curent temporizată, instalată pe linia respectivă, releele acestei protecții și releele secționării de curent fiind alimentate de la aceleași transformatoare de curent.

● Selectivitatea secționării homopolare se asigură prin alegerea curentului de pornire în funcție de curentul de scurtcircuit monofazat maxim exterior.

● Defectele monofazate apărute în zona moartă a secționării homopolare sînt lichidate de protecția maximală homopolară a liniei.

● Protecțiile blocurilor linie-transformator din varianta stațiilor cu racord adînc se realizează prin intermediul unei protecții maximale de curent, a unei secționări și a unei protecții homopolare, instalate la capătul dinspre alimentare al liniei, și prin intermediul unei protecții diferențiale și a unei protecții de gaze a transformatorului. Acestea din urmă comandă la distanță declanșarea întrerupătorului liniei (din stația de alimentare) prin intermediul unui cablu pilot.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Cum se asigură selectivitatea protecției maximale de curent a liniilor radiale?
   a) prin elemente direcționale?
   b) prin introducerea unor temporizări crescătoare de la consumatori spre sursă?
   c) prin introducerea unor temporizări crescătoare de la sursă spre consumatori?

2. În ce cazuri schemele protecției maximale de curent cu două transformatoare de curent și trei relee asigură o sensibilitate mai mare decît schemele cu două transformatoare de curent și două relee?
   a) în cazul liniilor care alimentează direct motoare electrice?
   b) în cazul liniilor care alimentează transformatoare cu conexiuni stea-stea?
   c) în cazul liniilor care alimentează transformatoare cu conexiuni stea-triunghi?
3. Dacă în locul de montare a protecției sînt instalate baterii de acumulatoare, care este cel mai indicat tip de curent operativ pentru alimentarea protecției?
   a) continuu?
   b) alternativ?
   c) redresat?
4. Cum se asigură protecția selectivă a liniilor radiale din rețele cu neutrul compensat?
   a) prin controlul valorii curentului de punere la pămînt?
   b) prin controlul tensiunii homopolare?
   c) prin controlul conținutului de armonici superioare în curenții homopolari?
5. Cum se stabilește curentul de pornire al secționării de curent pe liniile radiale?
   a) în funcție de curentul de sarcină maximă a liniei?
   b) în funcție de curentul de scurtcircuit exterior în regim minim?
   c) în funcție de curentul de scurtcircuit maxim exterior?
6. Ce performanță nu mai poate fi asigurată dacă s-ar adopta curentul de pornire al secționării de curent mai mare sau egal cu curentul de scurtcircuit maxim exterior, în scopul eliminării zonei moarte?
   a) rapiditatea?
   b) selectivitatea?
   c) siguranța?
7. Cum este asigurată lichidarea scurtcircuitelor între faze apărute în zona moartă a secționării?
   a) prin acțiunea protecției maximale de curent a liniei?
   b) prin acțiunea protecției maximale homopolare a liniei?
   c) prin acțiunea secționării homopolare a liniei?
8. Cum se calculează curentul de pornire al secționării de curent prevăzute pentru blocurile linie—transformator în varianta stațiilor cu racord adînc?
   a) în funcție de curentul maxim de sarcină al blocului?
   b) în funcție de curentul de scurtcircuit în regim maxim în cazul unui defect într-un punct situat între linie și transformator?
   c) în funcție de curentul de scurtcircuit în regim maxim în cazul unui defect după transformator?

CAPITOLUL 13

PROTECȚII DIRECȚIONALE ALE REȚELELOR BUCLATE

A. ASIGURAREA SELECTIVITĂȚII PROTECȚIILOR REȚELELOR BUCLATE

1. Necesitatea releelor direcționale

Rețelele buclate sînt rețele în care un scurtcircuit pe o linie sau într-un transformator poate fi alimentat numai pe două căi, indiferent de punctul în care a apărut defectul. Un exemplu de rețea buclată este reprezentat în figura 13.1; cele patru linii ale rețelei formează o buclă închisă, alimentarea fiind asigurată de centrala conectată la barele A; de la barele A, B, C și D pleacă și linii radiale.

Se constată că, în cazul unui scurtcircuit apărut pe una din linii, de exemplu în punctul K, alimentarea defectului se face pe două căi. Pentru lichidarea scurtcircuitului este necesară întreruperea alimentării defectului din toate direcțiile și de aceea liniile din rețele buclate sînt prevăzute la ambele capete cu întrerupătoare și cu protecții prin relee.

Secționînd bucla din figura 13.1 chiar în centrală, la barele A, se obține schema echivalentă din figura 13.2, formată dintr-o succesiune de linii cu alimentare bilaterală. Rețelele buclate pot fi întotdeauna reprezentate sub această formă.

În cazul rețelelor buclate, selectivitatea nu poate fi asigurată numai prin mijloace utilizate în cazul liniilor radiale. Astfel, în cazul protecțiilor maximale de curent nu este suficient numai principiul temporizărilor în trepte crescătoare de la consumatori spre sursă; în rețelele buclate, alimentarea defectelor se face din două direcții și valorile temporizărilor nu pot fi stabilite astfel încît la orice defect protecțiile liniei respective să acționeze cu cele mai mici temporizări (ceea ce ar reprezenta îndeplinirea condiției de selectivitate, întrucît toate celelalte linii ar rămîne în funcțiune).

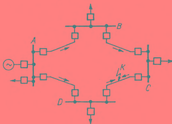


Fig. 13.1. Rețea buclată.

Combinînd temporizările în trepte cu introducerea unor relee direcționale, rezultă o protecție maximală de curent direcțională cu funcționale selectivă.

De asemenea, în cazul secționărilor de curent pentru rețele buclate selectivitatea nu poate fi asigurată numai prin alegerea corespunzătoare a valorii curentului de pornire, ci este necesară



Fig. 13.2. Rețea cu alimentare bilaterală echivalentă rețelei din figura 13.1.

și introducerea unor relee direcționale, rezultînd secționările de curent direcționale.

În mod analog, în componența protecțiilor homopolare din rețele buclate trebuie introduse relee direcționale, care asigură selectivitatea lichidării scurtcircuitelor monofazate.

2. Relee direcționale

În capitolul 3 este descris releul direcțional realizat pe principiul inducției, cuplul de rotație M_{rot} al releului avînd expresia:

$$M_{rot} = K_r U_r I_r \cos(\varphi_r + \alpha), \qquad (13.1)$$

în care:

U_r este valoarea efectivă a tensiunii la bornele bobinei de tensiune a releului;

I_r — valoarea efectivă a curentului din bobina de curent a releului;

φ_r — defazajul dintre fazorii $\underline{U}_r$ și $\underline{I}_r$, practic egal cu defazajul dintre fazorii $\underline{U}$ și $\underline{I}$, reprezentînd tensiunea și curentul liniei protejate (în punctul de instalare a protecției);

α — unghi intern al releului, definit în relația (3.40);

K_r — coeficient de proporționalitate.

Apariția unui scurtcircuit pe linia protejată este însoțită de o variație importantă — cu aproximativ 180° — a defazajului dintre tensiunea $\underline{U}$ și curentul $\underline{I}$ la unul din capetele liniei (v. fig. 2.1), deci de variația importantă a defazajului φ_r. Datorită acestei variații se schimbă semnul expresiei $\cos(\varphi_r + \alpha)$, deci se schimbă semnul și sensul cuplului M_{rot}, care acționează asupra elementului mobil al releului direcțional de la acel capăt al liniei la care a avut loc variația importantă a defazajului.

Pentru releul direcțional de la acest capăt, în regim normal de funcționare, cuplul M_{rot} acționează în sens opus închiderii contactelor releului, iar la apariția unui scurtciruit pe linie, cuplul M_{rot} acționează în sensul închiderii contactelor.

În prezent, protecțiile direcționale sînt realizate nu numai prin intermediul releelor de inducție, ci și prin intermediul releelor electromagnetice, magnetoelectrice și electronice. Posibilitatea unor asemenea realizări poate fi ilustrată pornind de la faptul că schimbarea semnului și sensului cuplului de rotație M_{rot} — din expresia (13.1) — are loc cînd este îndeplinită condiția:

$$\cos(\varphi_r + \alpha) = 0 \qquad (13.2)$$

deci cînd:

$$\varphi_r + \alpha = 90°,\ 270°,\ 450° \ldots \tag{13.3}$$

Într-adevăr, semnul cuplului M_{rot} este determinat de semnul termenului cos $(\varphi_r + \alpha)$ din expresia (13.1), întrucît ceilalți factori (K_r, U_r, I_r) sînt pozitivi. Rezultă astfel că pentru

$$-90° < \varphi_r + \alpha < 90° \tag{13.4}$$

se obține:

$$\cos(\varphi_r + \alpha) > 0 \tag{13.5}$$

și

$$M_{rot} > 0, \tag{13.6}$$

iar pentru

$$90° < \varphi_r + \alpha < 270° \tag{13.7}$$

se obține

$$\cos(\varphi_r + \alpha) < 0 \tag{13.8}$$

și

$$M_{rot} < 0. \tag{13.9}$$

Trecerea de la valorile negative la cele pozitive (și invers) ale cuplului M_{rot} are loc pentru:

$$\varphi_r + \alpha = 90° \tag{13.10}$$

și pentru

$$\varphi_r + \alpha = 270° = -90° \tag{13.11}$$

(considerînd numai valorile cuprinse între 0 și 360°) și, prin urmare, releul direcțional controlează valorile defazajului $\varphi_r + \alpha$ în raport cu valoarea de 90°.

Același control poate fi realizat indirect, pe altă cale, prin intermediul comparării unor amplitudini, ceea ce permite utilizarea releelor electromagnetice, magnetoelectrice sau electronice.

Controlul defazajului $\varphi_r + \alpha$ (în raport cu valoarea de 90°) prin intermediul comparării amplitudinilor poate fi pus în evidență cu ajutorul diagramei fazoriale din figura 13.3, între fazorii $\underline{N}_1$ și $\underline{N}_2$ existînd defazajul $\varphi_r + \alpha$.

Din figura 13.3, *a* se constată că dacă:

$$0° < \varphi_r + \alpha < 90°, \tag{13.12}$$

deci dacă este îndeplinită condiția (13.4), atunci între modulele sumei fazoriale:

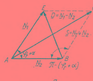
$$\underline{S} = \underline{N}_1 + \underline{N}_2 \tag{13.13}$$

și diferenței fazoriale:

$$\underline{D} = \underline{N}_1 - \underline{N}_2 \tag{13.14}$$

are loc relația:

$$S \equiv |\underline{S}| > |\underline{D}| \equiv D. \tag{13.15}$$



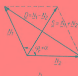


Fig. 13.3. Diagrame fazoriale pentru ilustrarea controlului unui defazaj prin intermediul comparării unor amplitudini:
a — cazul $\varphi_r + \alpha < 90°$; *b* — cazul $\varphi_r + \alpha > 90°$.

Dacă însă:

$$90° < \varphi_r + \alpha < 270°, \qquad (13.16)$$

deci dacă este îndeplinită condiția (13.7), atunci — conform diagramei din figura 13.3, *b* — rezultă:

$$S \equiv |\underline{S}| < |D| \equiv D. \qquad (13.17)$$

Presupunînd că închiderea contactelor releului are loc cînd $M_{rot} > 0$ — ca în relația (13.6) — și deci condiția de acționare este definită de expresiile (13.4) și (13.5), rezultă că pentru închiderea contactelor releului este necesară condiția (13.15).

În cele ce urmează se verifică faptul că de la condiția (13.15) se ajunge la condiția (13.5), cele două condiții fiind deci echivalente. Astfel, din relația (13.15) se obține prin ridicarea la pătrat:

$$S^2 > D^2. \qquad (13.18)$$

Aplicînd teorema lui Pitagora generalizată pentru triunghiul *ABE* din figura 13.3, *a* — corespunzătoare condiției de acționare (13.4), respectiv (13.12) — rezultă:

$$D^2 = N_1^2 + N_2^2 - 2N_1N_2 \cos(\varphi_r + \alpha). \qquad (13.19)$$

De asemenea, aplicînd aceeași teoremă pentru triunghiul *ABC* și avînd în vedere că unghiul din *B* este egal cu $180° - (\varphi_r + \alpha)$, iar latura *BC* este egală cu $N_1 \equiv |\underline{N}|_1$, rezultă:

$$S^2 = N_1^2 + N_2^2 - 2N_1N_2 \cos[180° - (\varphi_r + \alpha)] =$$

$$= N_1^2 + N_2^2 + 2N_1N_2 \cos(\varphi_r + \alpha). \qquad (13.20)$$

Înlocuind expresiile pentru D^2 și S^2 din relațiile (13.19) și (13.20) în inegalitatea (13.18), aceasta capătă aspectul:

$$N_1^2 + N_2^2 + 2N_1N_2 \cos(\varphi_r + \alpha) > N_1^2 + N_2^2 - 2N_1N_2 \cos(\varphi_r + \alpha),$$

respectiv:

$$4N_1N_2 \cos(\varphi_r + \alpha) > 0,$$

de unde rezultă:

$$\cos(\varphi_r + \alpha) > 0. \qquad (13.21)$$

Se constată astfel că, de la condiția de acționare (13.15), se ajunge la condiția (13.21), identică cu condiția (13.5), condițiile respective fiind deci echivalente.

Pentru realizarea unui releu direcțional prin intermediul comparării unor amplitudini este necesar ca acesta să fie alimentat cu suma și diferența fazorială a unor mărimi alternative, conform relațiilor (13.13) și (13.14). Întrucît între tensiunea liniei $\underline{U}$ și curentul liniei $\underline{I}$, din locul de instalare al protecției, există defazajul φ_r (practic egal cu defazajul dintre fazorii $\underline{U}_r$ și $\underline{I}_r$), iar releul direcțional trebuie să controleze defazajul $\varphi_r + \alpha$, se efectuează o defazare prealabilă în avans a tensiunii $\underline{U}$ cu unghiul α și după aceea are loc alimentarea releului direcțional.

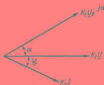


Fig. 13.4. Diagramă fazorială pentru determinarea mărimilor cu care trebuie alimentate bobinele unui releu direcțional funcționînd prin intermediul comparării unor amplitudini.

Astfel, din figura 13.4 se constată că între fazorii $\underline{K_1 U} e^{j\alpha}$ (defazat în avans cu unghiul α față de fazorul $\underline{K_1 U}$) și $\underline{K_2 I}$ — unde K_1 și K_2 sînt coeficienți reali — există defazajul $\varphi_r + \alpha$, care trebuie controlat de releul direcțional. Comparînd diagramele fazoriale din figurile 13.3 și 13.4, rezultă:

$$\underline{N}_1 = K_1 \underline{U} e^{j\alpha}; \quad (13.22)$$

$$\underline{N}_2 = K_2 \underline{I}. \quad (13.23)$$

Ca urmare, conform relațiilor (13.13) și (13.14), releul direcțional care controlează defazajul $\varphi_r + \alpha$, prin intermediul comparării unor amplitudini, este alimentat cu mărimile alternative:

$$\left.\begin{aligned} \underline{S} &= \underline{N}_1 + \underline{N}_2 = K_1 \underline{U} e^{j\alpha} + K_2 \underline{I} \\ \underline{D} &= \underline{N}_1 - \underline{N}_2 = K_1 \underline{U} e^{j\alpha} - K_2 \underline{I} \end{aligned}\right\} \quad (13.24)$$

și efectuează comparația modulelor S și D, acționînd cînd este îndeplinită condiția (13.15).

Obținerea mărimilor alternative definite de (13.24) se poate face prin însumarea fazorială a unor tensiuni.

În figura 13.5 este reprezentată schema simplificată a unui releu direcțional la care se efectuează însumarea fazorială a unor tensiuni, iar compararea amplitudinilor este realizată de un element de comparație EC, reprezentat de un releu electromagnetic polarizat sau de un amplificator electronic detector de polaritate. Transformatoarele auxiliare TA_1 și TA_2 au cîte două bobinaje secundare identice.

Notînd cu $\underline{U}_1$ și $\underline{U}_2$ tensiunile corespunzătoare fiecărui bobinaj secundar și ținînd seama de steluțele care indică începutul bobinajelor, rezultă că tensiunea $\underline{U}_{P1}$ cu care este alimentată puntea de redresare P_1 (redresare dublă alternanță, realizată cu diode semiconductoare) are expresia:

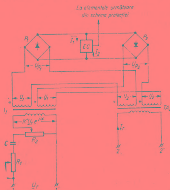


Fig. 13.5. Releu direcțional cu însumare fazorială a unor tensiuni.

$$\underline{U}_{P1} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2, \quad (13.25)$$

în timp ce pentru tensiunea $\underline{U}_{P2}$ de alimentare a punții P_2 se obține:

$$\underline{U}_{P2} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2. \quad (13.26)$$

Prin intermediul rezistențelor R_1 și R_2 și al condensatorului C, bobinajul primar al transformatorului TA_1 este alimentat cu o tensiune $\underline{K'U_r} e^{j\alpha}$, condensatorul și rezistențele menționate realizînd defazarea în avans cu unghiul α în raport cu tensiunea $\underline{U}_r$ (aplicată la bornele $1-1'$ de la un transformator de tensiune). Considerînd că tensiunea secundară

$\underline{U}_1$ a transformatorului TA_1 este aproximativ în fază cu tensiunea primară $\underline{U}_r e^{j\alpha}$, rezultă pentru tensiunea $\underline{U}_1$ expresia:

$$\underline{U}_1 = K_1 \underline{U}_r e^{j\alpha}, \tag{13.27}$$

în care K_1 este un coeficient de proporționalitate.

Prin bobinajul primar al transformatorului TA_2 (alimentat la bornele $2-2'$, de la un transformator de curent) circulă curentul $\underline{I}_r$. Presupunînd că tensiunea secundară $\underline{U}_2$ este aproximativ în fază cu curentul $\underline{I}_r$ din bobinajul primar, rezultă pentru tensiunea $\underline{U}_2$ expresia:

$$\underline{U}_2 = K_2 \underline{I}_r, \tag{13.28}$$

în care K_2 este un coeficient de proporționalitate.

Înlocuind expresiile tensiunilor $\underline{U}_1$ și $\underline{U}_2$ din relațiile (13.27) și (13.28) în relațiile (13.25) și (13.26), rezultă:

$$\underline{U}_{P1} = K_1 \underline{U}_r e^{j\alpha} + K_2 \underline{I}_r; \tag{13.29}$$

$$\underline{U}_{P2} = K_1 \underline{U}_r e^{j\alpha} - K_2 \underline{I}_r; \tag{13.30}$$

deci se obțin expresii analoage cu cele din relațiile (13.24). Întrucît elementul de comparație EC compară modulele U_{P1} și U_{P2} ale tensiunilor $\underline{U}_{P1}$ și $\underline{U}_{P2}$, releul descris controlează defazajul $\varphi_r + \alpha$ prin intermediul comparării unor amplitudini.

Modulele U_{P1} și U_{P2} se obțin prin redresarea efectuată de punțile P_1 și P_2. Elementul de comparație EC acționează cînd este îndeplinită condiția:

$$U_{P1} > U_{P2}, \tag{13.31}$$

analoagă cu condiția (13.15) și în acest caz transmite un semnal elementelor următoare din schema protecției.

Elementul de comparație poate fi reprezentat de un releu electromagnetic polarizat sau de un amplificator electronic detector de polaritate. În primul caz, datorită prezenței unui magnet permanent, releul polarizat acționează numai dacă prin bobina releului curentul are sensul curentului I_1 (fig. 13.5), debitat de puntea P_1; întrucît prin bobină curentul are valoarea $I_1 - I_2$ (unde I_2 este curentul debitat de puntea P_2), deoarece curenții I_1 și I_2 au sensuri opuse, rezultă că releul polarizat acționează dacă:

$$I_1 > I_2, \tag{13.32}$$

întrucît în acest caz diferența $I_1 - I_2$ are semnul și sensul curentului I_1.

Condiția de acționare (13.32) este îndeplinită dacă este îndeplinită condiția (13.31), corespunzătoare condiției (13.15) pentru acționarea releelor direcționale.

Cînd elementul de comparație este un amplificator electronic detector de polaritate, cum este cazul releului direcțional tranzistorizat *RDc* realizat la ICEMENERG (numit releu direcțional static), semnalul de la ieșirea amplificatorului apare cînd sînt îndeplinite condițiile (13.31) și (13.32); numai în acest caz, tranzistorul primului etaj de amplificare trece din starea de conducție în starea de blocare și la ieșirea primului etaj apare o tensiune diferită de zero. Această tensiune determină intrarea în acțiune a celorlalte elemente componente ale amplificatorului.

B. PROTECŢIA MAXIMALĂ DE CURENT DIRECŢIONALĂ A LINIILOR DIN REŢELELE BUCLATE

1. Principii de realizare

Protecţia maximă direcţională a liniilor este prevăzută împotriva scurtcircuitelor între faze şi conţine relee de curent, relee de timp, relee direcţionale şi relee intermediare de ieşire.

Folosirea combinată a principiului temporizărilor în trepte cu principiul direcţional în scopul obţinerii unei lichidări selective a defectelor este ilustrată în figura 13.6 *a*, fiind reprezentate cinci linii alimentate de cele două centrale racordate la barele *A* şi *B*. La capetele liniilor sînt figurate relee direcţionale şi relee de timp, fără a fi indicate şi relee de curent.

Pentru asigurarea selectivităţii, toate releele direcţionale sînt astfel alimentate (de transformatoarele de curent şi de tensiune), încît să acţioneze numai atunci cînd în locul de instalare a protecţiei curentul are sensul convenţional de la bare spre interiorul zonei protejate, deci spre linie; acest sens convenţional corespunzător acţionării releelor direcţionale este indicat printr-o săgeată în interiorul releelor direcţionale din schemele de protecţie.

Tot în scopul asigurării selectivităţii, temporizările releelor de timp instalate spre centrala *A* (releele de timp din protecţiile *1, 2, 3, 4, 5*) se reglează ca şi cum reţeaua protejată ar fi o reţea radială alimentată numai de centrala din *A*, deci ca şi cum centrala din *B* nu ar exista. Ca urmare, temporizarea t_{a5} se alege cu o treaptă de timp Δt mai mare decît temporizarea protecţiei de pe linia radială care pleacă de la barele *B* (sau a protecţiei consumatorilor racordaţi la barele *B*, dacă de la aceste bare nu pleacă liniile radiale), iar temporizările t_{a4}, t_{a3}, t_{a2}, t_{a1} se aleg în trepte crescătoare spre centrala *A*, rezultînd diagrama din partea superioară a figurii 13.6, *b*. Temporizările t'_a ale releelor din protecţiile *1', 2', 3', 4', 5'* se aleg în trepte crescătoare spre centrala *B* (diagrama din partea inferioară a fig. 13.6, *b*).

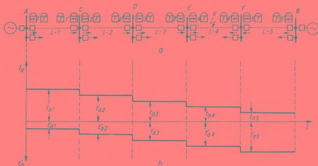


Fig. 13.6. Protecţia maximală de curent direcţională a unei reţele cu alimentare bilaterală: *a* — reprezentarea simplificată a reţelei cu relee direcţionale (pentru o singură fază) şi de timp; *b* — diagrama temporizărilor.

În cazul unui scurtcircuit în orice punct al rețelei, de exemplu în punctul *K* de pe linia *L-4*, sensurile convenționale ale curenților de scurtcircuit debitați de centralele *A* și *B* sînt marcate în figura 13.6, *a*. Se constată că, în acest caz, acționează releele direcționale din componența protecțiilor *1*, *2*, *3*, *4*, *4'* și *5'*, întrucît numai la aceste relee sensul convențional al curentului de defect coincide cu sensul săgeții din interiorul releului. Protecțiile *1'*, *2'*, *3'*, *5* nu pot acționa, blocarea lor fiind determinată de faptul că releele direcționale ale acestor protecții nu își închid contactele.

Din diagrama temporizărilor (fig. 13.6, *b*) se constată că dintre protecțiile *1*, *2*, *3*, *4* (protecțiile situate între *A* și *K*, care pot acționa), cea mai mică temporizare o are protecția *4*, iar dintre protecțiile *4'* și *5'* (protecțiile situate între *K* și *B*, care pot acționa), cea mai mică temporizare o are protecția *4'*. În consecință, releul de timp din protecția *4* își închide contactele înaintea tuturor releelor de timp din protecțiile instalate între *A* și *K*, iar contactele releului de timp *4'* se închid înaintea contactelor tuturor releelor de timp din protecțiile instalate între *K* și *B*.

Rezultă astfel că protecțiile *4* și *4'* comandă declanșarea celor două întrerupătoare ale liniei defecte *L-4* mai înainte ca alte declanșări să poată avea loc, deci scurtcircuitul din *K* este lichidat selectiv, întrucît linia defectă este scoasă din funcțiune și toate celelalte linii își continuă funcționarea. Se remarcă faptul că ieșirea din funcțiune a liniei defecte *L-4* nu provoacă întreruperea alimentării vreunei linii radiale, deci toți consumatorii din rețea rămîn alimentați; acest avantaj caracterizează rețelele buclate și rețelele complexe, spre deosebire de rețelele radiale.

Aceleași concluzii se obțin dacă ar fi considerată o rețea buclată cu alt număr de linii sau apariția unui defect într-un punct diferit de punctul *K*.

2. Scheme trifilare

Fiind prevăzută împotriva scurtcircuitelor între faze, protecția maximală de curent direcțională se montează pe două faze, întrucît la orice tip de scurtcircuit între faze este afectată de defect cel puțin una dintre fazele pe care este instalată protecția, ceea ce asigură acționarea protecției și lichidarea defectului. Schema trifilară a protecției maximale de curent direcționale, instalată la unul din capetele liniei protejate, este reprezentată în figura 13.7.

Transformatoarele de curent *TC* alimentează releele de curent *1* și bobinele de curent ale releelor direcționale *2*, iar transformatorul de tensiune *TT* alimentează bobinele de tensiune ale releelor *2*. Releele de curent *1* pot comanda releul de timp *3* numai dacă au acționat și releele direcționale *2*, contactele releelor *1* și *2* fiind legate în serie. Dacă releele *2* nu-și închid contactele atunci releul *3* nu poate fi comandat, chiar

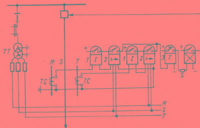


Fig. 13.7. Schema trifilară a protecției maximale de curent direcționale.

dacă releele *1* și-au închis contactele, deci în absența acționării releelor direcționale protecția este blocată.

Alimentarea bobinelor de curent și de tensiune ale releelor direcționale se face în conformitate cu o schemă numită „schema de 90°". După cum se constată din figura 13.7, această schemă de conexiuni prevede ca pentru releul direcțional a cărui bobină de curent este alimentată de transformatorul de curent de pe faza *R* bobina de tensiune să fie alimentată cu tensiunea dintre celelalte două faze; în mod analog sînt alimentate bobinele de curent și de tensiune ale celuilalt releu direcțional.

Schema de conexiuni menționată are avantajul de a asigura o sensibilitate ridicată.

Pentru releele de curent *1* (v. fig. 13.7), valoarea curentului de pornire se determină ca și la protecțiile maximale de curent ale liniilor radiale folosind relația (12.3).

Ca și protecțiile maximale de curent de pe liniile radiale, protecțiile maximale de curent direcționale ale liniilor cu alimentare bilaterală au dezavantajul unor temporizări ridicate pentru lichidarea defectelor. De aceea, protecțiile maximale de curent direcționale sînt de regulă utilizate ca protecții de rezervă pe lîngă protecții de bază rapide; ca protecții de bază ele sînt de obicei folosite numai în rețele cu tensiunea pînă la 20 kV.

C. ALTE PROTECȚII ALE REȚELELOR BUCLATE

1. Secționarea de curent direcțională

Pentru linia cu alimentare bilaterală din figura 13.8, *a* cu secționările de curent de la cele două capete reprezentate simbolic prin releele de curent *1* și *2*, se consideră că punctul de scurtcircuit polifazat se deplasează de la barele *A* spre barele *B*, ceea ce determină variația curenților de scurtcircuit I_{scA} și I_{scB} debitați de centralele din *A* și *B*, în conformitate cu curbele din figura 13.8, *b*. Curentul I_{scA} scade cu depărtarea defectului de barele *A* (deci cu creșterea distanței *l*, măsurată între defect și barele *A*), deoarece crește impedanța dintre defect și centrala din *A*, iar curentul I_{scB} crește cu distanța *l*, deoarece scade impedanța dintre defect și centrala din *B*.

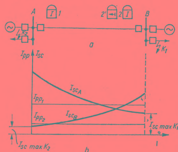


Fig. 13.8. Secționarea de curent direcțională:
a — schema simplificată a liniei cu alimentare bilaterală cu releele de curent și direcționale (pentru o singură fază); *b* — diagramă de variație a curenților de scurtcircuit.

Dacă se aleg curenții de pornire I_{pp1} și I_{pp2} ai secționării lor cu relații analoage cu relația (12.8) — folosită la secționările de pe linii radiale — în funcție de curenții de defect exterior $I_{sc\,max\,K_1}$ și $I_{sc\,max\,K_2}$, se constată că funcționarea protecțiilor nu este selectivă. Astfel, dacă la un scurtcircuit exterior în punctul K_1 secționarea *1*

nu acţionează, şi deci funcţionează selectiv, în schimb secţionarea *2* acţionează neselectiv, deoarece curentul $I_{sc\,max\,K1}$ este mai mare decît I_{pp2}.

Pentru eliminarea posibilităţii unor asemenea funcţionări neselective este necesară instalarea unor relee direcţionale — reprezentate simbolic prin releul *2'* — care să permită acţionarea secţionării respective numai la defecte pe linie şi să blocheze protecţia la defecte exterioare; rezultă astfel o secţionare direcţională.

Schemele trifilare ale secţionărilor direcţionale, reprezentînd protecţii rapide ale liniilor cu alimentare bilaterală împotriva scurtcircuitelor între faze, sînt asemănătoare cu schemele trifilare ale protecţiilor maximale direcţionale (de exemplu, cu schema din fig. 13.7) fără însă să mai cuprindă releul de timp. Pentru economie de transformatoare de curent, protecţia maximală direcţională şi secţionarea direcţională pot fi alimentate de aceleaşi transformatoare de curent atunci cînd sînt folosite împreună — ca protecţie de bază şi ca protecţie de rezervă împotriva scurtcircuitelor între faze — pe o linie cu alimentare bilaterală.

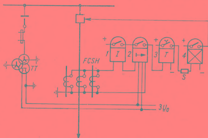
2. Protecţia homopolară direcţională

Pe liniile cu alimentare bilaterală din reţele cu tensiunea de 110 kV sau mai mare pot fi folosite împotriva scurtcircuitelor monofazate protecţia maximală homopolară direcţională şi secţionarea homopolară direcţională. Acestea se deosebesc de protecţiile maximale homopolare şi de secţionările homopolare de pe liniile radiale prin introducerea unui releu direcţional, necesar pentru asigurarea selectivităţii.

Pentru a ilustra modul de alimentare a acestui releu, în figura 13.9 este reprezentată schema trifilară a unei protecţii maximale homopolare direcţionale, formată din releul de curent *1*, releul direcţional *2*, releul de timp *3* şi releul intermediar de ieşire *4*; releul de curent *1* şi bobina de curent a releului *2* sînt alimentate de filtrul *FCSH*. Bobina de tensiune a releului direcţional *2* este alimentată de bobinajul secundar conectat în triunghi deschis al transformatorului de tensiune *TT*, deci este alimentată cu o tensiune proporţională cu componenta de secvenţă homopolară U_0 a tensiunii.

Ca şi la liniile radiale, pentru alimentarea protecţiilor homopolare direcţionale pot fi utilizate şi transformatoarele de curent care alimentează protecţiile maximale de curent direcţionale şi secţionările de curent direcţionale, rezultînd astfel o economie importantă de transformatoare de curent.

De asemenea, releul direcţional de procese tranzitorii *RDT*, menţionat la protecţia homopolară a liniilor radiale, asigură şi protecţia homopolară a liniilor din reţelele buclate, datorită proprietăţilor direcţionale.



Fg. 13.9. Schema trifilară a protecţiei maximale homopolare direcţionale.

● Releele direcționale controlează defazajul dintre doi fazori. De cele mai multe ori, în practică, releele acționează la trecerea defazajului controlat prin valoarea de 90°.

● Controlul defazajului dintre doi fazori poate fi efectuat prin intermediul controlului unor amplitudini, comparînd modulele sumei și diferenței celor doi fazori. Pe acest principiu se bazează funcționarea releului direcțional tranzistorizat RDc fabricat la ICEMENERG.

● Pentru asigurarea selectivității protecției maximale direcționale a liniilor cu alimentare bilaterală este necesar să se folosească relee direcționale și temporizări.

● Releele direcționale se montează astfel încît să acționeze atunci cînd în locul de instalare al protecției curentul are sensul convențional de la bare spre linie.

● Temporizările protecțiilor instalate la capetele liniilor dinspre una din sursele de alimentare se reglează în trepte crescătoare pornind de la a doua sursă de alimentare.

● Pentru scurtcircuitele polifazate, releele direcționale sînt de regulă alimentate în „schema de 90°", care asigură o sensibilitate ridicată.

● Curenții de pornire ai secționărilor direcționale se calculează ca la secționările liniilor radiale, iar selectivitatea este asigurată de releele direcționale.

● Releul direcțional al protecțiilor maximale homopolare direcționale este alimentat cu un curent proporțional cu componenta de secvență homopolară a curentului și cu o tensiune proporțională cu componenta de secvență homopolară a tensiunii.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Ce valoare a defazajului controlat determină schimbarea sensului cuplului de rotație al releelor direcționale de inducție?
   a) 90° ?
   b) 60° ?
   c) 120° ?
2. Pe ce principiu se bazează funcționarea releului direcțional RDc realizat la ICEMENERG?
   a) controlul defazajelor cu element de inducție?
   b) controlul amplitudinilor cu releu polarizat?
   c) controlul amplitudinilor cu amplificator electronic tranzistorizat detector de polaritate?
3. Ce performanță a protecției maximale direcționale este obținută prin introducerea releelor direcționale și a temporizării în trepte?
   a) rapiditatea?
   b) selectivitatea?
   c) sensibilitatea?
4. Cum sînt alimentate releele direcționale din schemele protecțiilor homopolare direcționale?
   a) cu tensiunea și curentul liniei?
   b) cu tensiunea liniei și curentul homopolar?
   c) cu tensiunea homopolară și curentul homopolar?

CAPITOLUL 14

PROTECȚIA REȚELELOR ELECTRICE COMPLEXE

A. PROTECȚIA DE DISTANȚĂ

1. Asigurarea selectivității

Rețelele complexe sînt rețelele electrice în care un scurtcircuit poate fi alimentat pe mai mult de două căi: în aceste rețele există deci noduri în care se întîlnesc cel puțin trei elemente racordate la rețele care conțin surse de alimentare. Ca exemplu, în figura 14.1 este reprezentată o rețea complexă, formată din patru linii și trei centrale, în nodul constituit de barele *E* întîlnindu-se liniile *L-1*, *L-2* și *L-4*, care pot fi alimentate de centralele *A*, *B* și *C*. Cele patru linii sînt protejate de protecții de distanță, realizate cu ajutorul unor relee de impedanță, numerotate de la *1* la *8*.

În cazul unor scurtcircuite directe (fără arc), releele de impedanță pot controla valoarea unei impedanțe Z, care este proporțională cu distanța dintre defect și locul de instalare a protecției. Ca urmare, releele de impedanță de la capetele liniei defecte măsoară impedanțe avînd cele mai mici valori, întrucît pentru aceste relee distanțele pînă la defect sînt mai mici, în comparație cu distanțele dintre defect și releele de impedanță de pe celelalte linii. Acest principiu, care stă la baza funcționării protecțiilor de distanță, este ilustrat și cu ajutorul schemei din figura 14.1.

În mod convențional, pe schemă este reprezentată variația valorilor efective ale tensiunii remanente U_{rem}, în cazul unui scurtcircuit direct în punctul *K*, pe linia *L-2*. Conform relației (2.22), tensiunea remanentă într-un anumit punct al rețelei este proporțională cu distanța pînă la defect și cu valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit care circulă prin punctul respectiv; în consecință, tensiunea remanentă crește cu cît punctul considerat se depărtează de defectul din *K*, iar această creștere depinde de valoarea curentului

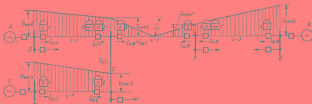


Fig. 14.1. Rețea complexă cu reprezentarea simplificată a tensiunilor remanente și a releelor de impedanță și direcționale (pentru o singură fază).

de scurtcircuit: pe porțiunile în care curentul este mai mare, tensiunea remanentă crește mai repede, și invers.

În figura 14.1 este reprezentată convențional și circulația curenților de defect. Întrucît pe porțiunea *EK* a liniei *L-2* circulă un curent mare, reprezentat de suma $\underline{I}_{scA} + \underline{I}_{scC}$ a curenților de defect debitați de centralele *A* și *C*, tensiunea remanentă crește pe această porțiune mai repede decît pe porțiunea *KF* a liniei *L-2*, prin care circulă numai curentul $\underline{I}_{scB}$, debitat de centrala *B* (s-a presupus că există relația: $|\underline{I}_{scB}| < |\underline{I}_{scA} + \underline{I}_{scC}|$). De-a lungul liniei *L-3*, tensiunea remanentă crește la fel ca pe porțiunea *KF* a liniei *L-2*, deoarece curentul de defect are tot valoarea I_{scB}.

De la valoarea U_{remE} (a tensiunii remanente la barele *E*), tensiunea remanentă crește de-a lungul liniilor *L-1* și *L-4*; se constată că pe linia *L-4* tensiunea remanentă crește mai repede decît pe linia *L-1*, ceea ce presupune că între valorile efective ale curenților I_{scA} și I_{scC} există relația $I_{scC} > I_{scA}$.

Considerînd că releele de impedanță *1* ... *8* acționează în funcție de valoarea impedanței *Z* definită — conform relației (2.23) — de raportul:

$$Z = \frac{U_{rem}}{I_{sc}}, \tag{14.1}$$

se constată că pentru releul *3* această impedanță (notată cu Z_3) are valori mai mici decît pentru releele *1*, *2*, *7* și *8*, situate — ca și releul *3* — între punctul de defect *K* și centralele *A* și *C*. Astfel, au loc relațiile:

$$Z_3 = \frac{U_{rem\,E}}{|\underline{I}_{scA} + \underline{I}_{scC}|}; \tag{14.2}$$

$$Z_2 = \frac{U_{remE}}{I_{scA}}; \tag{14.3}$$

$$Z_1 = \frac{U_{remD}}{I_{scA}}; \tag{14.4}$$

$$Z_8 = \frac{U_{remE}}{I_{scC}}; \tag{14.5}$$

$$Z_7 = \frac{U_{remH}}{I_{csC}}, \tag{14.6}$$

în care :

Z_2, Z_1, Z_8, Z_7 sînt impedanțele controlate de releele *2*, *1*, *8*, *7*; I_{scA}, I_{scC} — modulele fazorilor $\underline{I}_{scA}$, $\underline{I}_{scC}$.

Întrucît:

$$\left.\begin{aligned} U_{remE} &< U_{remD} \\ U_{remE} &< U_{remH} \\ I_{scA} &< |\underline{I}_{scA} + \underline{I}_{scC}| \\ I_{scC} &< |\underline{I}_{scA} + \underline{I}_{scC}| \end{aligned}\right\} \tag{14.7}$$

din relațiile (14.2) ... (14.7) rezultă:

$$Z_3 < Z_2,\ Z_3 < Z_1,\ Z_3 < Z_8,\ Z_3 < Z_7, \tag{14.8}$$

deoarece pentru Z_3 numărătorul are o valoare mai mică sau egală cu valoarea numărătorului pentru Z_2, Z_1, Z_8, Z_7, iar numitorul pentru Z_3 are cea mai mare valoare. Se verifică astfel faptul că releul *3* — de pe linia defectă — măsoară impedanța cea mai mică în raport cu toate celelalte relee situate între defect și centralele *A* și *C*.

Dacă timpul de acționare al protecțiilor de distanță este cu atît mai mic cu cît impedanța controlată Z este mai mică, releul *3* comandă declanșarea întrerupătorului liniei defecte *L-2* înainte ca protecțiile *2*, *1*, *8* și *7* să acționeze, deci selectivitatea este astfel asigurată.

Din considerentele făcute rezultă că o protecție de distanță trebuie să conțină relee de impedanță — care să controleze valoarea impedanței Z (aceste relee îndeplinesc funcțiunea de *elemente de măsură*) — și relee de timp. Elementele de măsură și de timp nu sînt suficiente pentru asigurarea selectivității; acest lucru rezultă imediat dacă este considerată acționarea releelor *4* și *5*. În cazul defectului din K, impedanțele Z_4 și Z_5 controlate de aceste relee au valorile:

$$Z_4 = \frac{U_{remF}}{I_{scB}}; \tag{14.9}$$

$$Z_5 = \frac{U_{remF}}{I_{scB}}, \tag{14.10}$$

deci:

$$Z_4 = Z_5. \tag{14.11}$$

Ca urmare, timpul de acționare al protecțiilor de distanță fiind determinat de valoarea impedanței controlate Z, rezultă că nu apare o diferență între timpii de acționare ai protecțiilor *4* și *5*, și deci protecția *5* ar putea comanda neselectiv declanșarea întrerupătorului liniei *L-3*, deși defectul a apărut pe linia *L-2*. Pericolul funcționării neselective poate fi înlăturat introducînd în componența protecțiilor de distanță elemente direcționale, care acționează cînd curentul are sensul convențional de la bare spre linie; pentru linia *L-3*, elementul direcțional este reprezentat simbolic prin releul *5'*, care blochează protecția *5* la apariția scurtcircuitului din K și defectul este lichidat selectiv de protecția *4*.

Într-adevăr, deoarece:

$$U_{remF} < U_{remG} \tag{14.12}$$

și

$$Z_4 = \frac{U_{remF}}{I_{scB}}, \tag{14.13}$$

iar

$$Z_6 = \frac{U_{remG}}{I_{scB}}, \tag{14.14}$$

rezultă:

$$Z_4 < Z_6, \tag{14.15}$$

deci protecția *4* acționează cu un timp mai mic decît protecția *6*, comandînd declanșarea întrerupătorului liniei defecte *L-2* și lichidînd selectiv defectul.

Dacă centrala C și linia *L-4* nu sînt în funcțiune, atunci $I_{scC} = 0$ și la defecte în K releele *2* și *3* ar controla impedanțe egale:

$$Z_2 = Z_3 = \frac{U_{remE}}{I_{scC}}, \tag{14.16}$$

ceea ce conduce la introducerea elementului direcțional *2'* pentru asigurarea selectivității.

În mod analog, considerînd defecte în diferite puncte poate fi demonstrată necesitatea elementelor direcționale în componența tuturor protecțiilor de distanță din schemă, în scopul asigurării lichidării selective a oricăror defecte apărute.

Rezultă astfel că pentru obținerea unei funcționări selective protecțiile de distanță trebuie să conțină *elemente de măsură* (relee de impedanță), *elemente de timp* și *elemente direcționale.*

2. Elemente de pornire și de blocare

Pe lîngă elementele necesare asigurării selectivității, menționate în paragraful precedent, protecțiile de distanță conțin *elemente de pornire* și *elemente de blocare.*

● Ca și în cazul altor tipuri de protecții, **elementele de pornire** ale protecțiilor de distanță au rolul de a sesiza apariția unui defect în sistemul electric (fără a localiza instalația electrică în care a apărut) și de a comanda intrarea în funcțiune a protecțiilor; în urma acestei comenzi, elementele care asigură selectivitatea detectează linia defectă și determină declanșarea întrerupătoarelor acestei linii.

În marea majoritate a protecțiilor de distanță utilizate în prezent, elementele de pornire sînt realizate ca relee de impedanță, ca și elementele de măsură; numai în unele protecții de distanță elementele de pornire sînt realizate ca relee maximale de curent.

În toate cazurile, elementele de pornire sînt montate pe toate trei fazele, deoarece au și rolul de a comanda o serie de comutări în schema protecției (efectuate cu ajutorul unor relee intermediare) în funcție de fazele afectate de defect.

● **Elementele de blocare** au rolul de a împiedica acționările greșite ale protecțiilor de distanță în absența unor defecte pe linia protejată.

Asemenea acționări greșite pot avea loc, de exemplu, în cazul arderii siguranțelor transformatorului de tensiune care alimentează circuitele de tensiune ale releelor de impedanță; în acest caz, tensiunea de alimentare a acestor circuite devine nulă, căpătînd astfel aceeași valoare ca și în cazul unui scurtcircuit direct (fără arc), apărut chiar în locul de instalare a protecției, cînd tensiunea remanentă U_{rem} în acest punct se anulează. În ambele regimuri menționate, impedanța Z, controlată de releele respective, devine nulă — întrucît $Z = \frac{U}{I}$ și $U = 0$ — ceea ce determină acționarea releelor de impedanță, fiind îndeplinită condiția de acționare (2.19).

Pentru eliminarea posibilității unor acționări greșite în cazul arderii siguranțelor transformatorului de tensiune, protecția de distanță poate fi prevăzută cu elemente de blocare care permit acționarea numai dacă simultan cu scăderea importantă a tensiunii are loc și o creștere a curentului liniei. Întrucît o asemenea creștere apare numai în cazul scurtcircuitelor și nu apare la arderea siguranțelor transformatorului de tensiune, protecția este blocată în acest din urmă caz.

Alte acționări greșite ale protecțiilor de distanță pot avea loc în cazul apariției unor pendulări, cînd variația tensiunilor și a curenților poate conduce la îndeplinirea condiției de acționare (2.19). Pentru eliminarea acestui pericol, protecțiile de distanță pot fi prevăzute cu elemente de blocare împotriva acționărilor greșite la pendulări. La noi în țară, la ICEMENERG, se fabrică asemenea elemente de blocare; funcționarea lor se bazează pe faptul că în cazul scurtcircuitelor apare componenta de secvență inversă I_2 a curentului, în timp ce în cazul pendulărilor această componentă nu apare.

3. Caracteristici de timp ale protecțiilor de distanță



Fig. 14.2. Caracteristică de timp în trepte.

S-a menționat că pentru asigurarea selectivității este necesar ca timpul de acționare t_a al protecției de distanță să scadă cînd impedanța controlată Z scade, deci să crească cu creșterea impedanței Z. Această dependență:

$$t_a = f(Z) \qquad (14.17)$$

reprezintă caracteristica de timp a protecției.

În prezent, cele mai utilizate caracteristici de timp sînt cele în trepte, avînd aspectul din figura 14.2, cu trei sau patru trepte; aceste caracteristici au avantajul că pot fi obținute cu elemente de timp de construcție relativ simplă.

În figura 14.3 este reprezentată caracteristica de timp cu trei trepte a protecției de distanță *1*, instalată pe linia *L-1*, fiind ilustrată alegerea timpilor de acționare t_{a1}, t_{a2}, t_{a3} și lungimile zonelor corespunzătoare celor trei trepte: *zona I*, *zona II*, *zona III*. Întrucît impedanțele controlate Z sînt proporționale — în cazul scurtcircuitelor directe, fără arc — cu distanțele l dintre defect și locul de instalare al protecției, conform relației (2.23), caracteristica de timp poate fi reprezentată și în coordonate t_a, l, rezultînd o dependență de forma:

$$t_a = F(l), \qquad (14.18)$$

în locul dependenței (14.17).

În figura 14.3, axa absciselor poate fi gradată fie în valori ale impedanței Z, fie în valori ale distanței l.

Pentru prima treaptă, timpul de acționare t_{a1} este reprezentat numai de timpul propriu al protecției și întrerupătorului, defectele din zona *I* (cum este cel din punctul K_1) fiind deci lichidate rapid.

● **Zona I** se extinde numai pe 80—85% din lungimea liniei protejate *L-1* (porțiunea *CG*), deși ar fi fost de dorit ca pe întreaga lungime a liniei defectele să fie lichidate rapid. O asemenea extindere a lungimii zonei *I* nu este însă posibilă, datorită pericolului unor acționări neselective. Astfel, la defecte în punctele K' și K'' (din imediata apropiere a întrerupătoarelor de pe liniile *L-2* și *L-1*), impedanțele controlate de releul *1* au valori foarte apro-

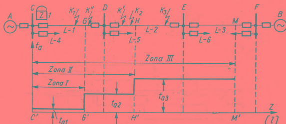


Fig. 14.3. Reprezentarea zonelor de acționare ale unei protecții de distanță.

piate și, ca urmare, avînd în vedere și erorile releelor de impedanță, reglarea releului *1* pentru a acționa rapid la defectul din K'' ar putea determina o acționare rapidă a acestui releu și la defectul exterior din K'; o asemenea acționare ar fi neselectivă, deoarece la un defect pe linia *L-2* ar fi comandată rapid declanșarea întrerupătorului liniei *L-1*, înainte ca protecția liniei *L-2* să poată asigura lichidarea selectivă a defectului din punctul K'.

● **Zona II** se extinde între punctele *C* și *H*, cuprinzînd 30—40% din lungimea liniei *L-2*. Întrucît defectele din zona *I* sînt lichidate rapid, numai defectele din porțiunea *GH* a zonei *II* (cum este defectul din punctul K_2) sînt lichidate cu temporizarea t_{a2} a treptei a doua a caracteristicii de timp.

Din condiția de selectivitate temporizarea t_{a2} trebuie să satisfacă relația:

$$t_{a2} \geq t_{a1} + \Delta t, \tag{14.19}$$

în care $\Delta t \cong 0,4—0,5$ s.

Ca urmare, temporizarea t_{a2} rezultă cu o treaptă mai mare decît timpul de acționare al protecției de pe linia *L-2*, pentru ca un defect pe această linie — de exemplu, în punctul K_2 — să fie lichidat selectiv de protecția liniei *L-2*.

● **Zona III** se extinde și pe o porțiune a liniei *L-3*, protecția *1* asigurînd astfel o rezervă de la distanță pentru protecțiile liniilor *L-2* și *L-3*, de exemplu pentru un scurtcircuit în punctul K_3. Din condiția de selectivitate, temporizarea t_{a3} trebuie să satisfacă o relație analoagă cu relația (14.19):

$$t_{a3} \geq t_{a2} + \Delta t, \tag{14.20}$$

valoarea t_{a3} fiind calculată în funcție de temporizările protecțiilor de rezervă de pe liniile *L-2* și *L-3* și ale protecțiilor de rezervă ale transformatoarelor din stația *E* (aceste transformatoare nu sînt reprezentate în fig. 14.3).

Pentru ilustrarea aspectului de ansamblu al caracteristicilor de timp ale protecțiilor de distanță dintr-o rețea electrică, în figura 14.4 sînt reprezentate caracteristicile de timp ale protecțiilor *1, 3, 5* (în partea superioară a axei absciselor) și ale protecțiilor *2, 4, 6* (în partea inferioară a axei absciselor). Se constată că pe fiecare linie există porțiuni în care defectele sînt lichidate rapid de protecțiile de la ambele capete (porțiunile *MG, PR, ST*), precum și porțiuni în care defectele sînt lichidate rapid de protecția de la un capăt și sînt lichidate cu temporizarea t_{a2} a treptei a doua de protecția de la capătul opus.

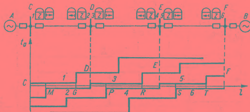


Fig. 14.4. Reprezentarea simplificată a protecțiilor de distanță dintr-o rețea și a caracteristicilor de timp.

4. Caracteristicile de acționare ale releelor de impedanță

Releele de impedanță constituie elementele de măsură ale protecțiilor de distanță și în majoritatea protecțiilor de distanță intervin și în componența elementelor de pornire.

Releele de impedanță sînt relee minimale, întrucît în cazul unui scurtcircuit tensiunea U scade și curentul I crește, deci impedanța Z, definită de raportul:

$$Z = \frac{U}{I} \tag{14.21}$$

scade mult.

Trecînd de la mărimi primare (tensiunea U și curentul liniei I) la mărimi secundare, obținute în secundarele transformatoarelor de tensiune și de curent, se obține impedanța măsurată (sesizată) de releu:

$$Z_r = \frac{U_r}{I_r}, \tag{14.22}$$

unde:

U_r este tensiunea aplicată bobinei de tensiune a releului (sau circuitului de tensiune);
I_r — curentul prin bobina de curent a releului (sau prin circuitul de curent).

Între mărimile U și U_r, respectiv I și I_r, au loc relațiile:

$$U_r = \frac{U}{n_{TT}} \tag{14.23}$$

și

$$I_r = \frac{I}{n_{TC}}, \tag{14.24}$$

unde n_{TT} și n_{TC} sînt rapoartele de transformare ale transformatoarelor de tensiune și de curent.

Înlocuind expresiile U_r și I_r din (14.23) și (14.24), în relația (14.22), se obține:

$$Z_r = \frac{U_r}{I_r} = \frac{\frac{U}{n_{TT}}}{\frac{I}{n_{TC}}} = \frac{U}{I} \frac{n_{TC}}{n_{TT}}; \tag{14.25}$$

avînd în vedere și egalitatea (14.21), relația (14.22) capătă forma:

$$Z_r = Z \frac{n_{TC}}{n_{TT}}, \tag{14.26}$$

impedanța secundară Z_r, măsurată de releul de impedanță, fiind deci proporțională cu impedanța primară Z, controlată de protecția de distanță.

După cum a rezultat din relația (2.23), impedanța primară Z reprezintă (în ipoteza unui scurtcircuit direct, fără arc) chiar impedanța liniei dintre defect și locul de instalare al protecției și este proporțională cu distanța dintre defect și punctul în care este instalată protecția.

Notînd cu Z_{pr} impedanţa de pornire a releului de impedanţă, condiţia de acţionare (2.19), referitoare la mărimi primare controlate de protecţia de distanţă, capătă forma:

$$Z_r \leqslant Z_{pr}, \tag{14.27}$$

corespunzătoare mărimilor secundare cu care este alimentat releul de impedanţă.

Între mărimile Z_{pr} şi Z_{pp}, din relaţiile (2.19) şi (14.27), există o relaţie asemănătoare cu cea din expresia (14.26), respectiv:

$$Z_{pr} = Z_{pp} \frac{n_{TC}}{n_{TT}}. \tag{14.28}$$

Înlocuind expresia Z_r din relaţia (14.22) în relaţia (14.27), se obţine condiţia de acţionare a releelor de impedanţă sub forma:

$$\frac{U_r}{I_r} \leqslant Z_{pr}. \tag{14.29}$$

Caracteristicile de acţionare ale releelor de impedanţă se reprezintă în planul complex al impedanţelor şi sînt definite de cazul limită al egalităţii din relaţiile (2.19), (14.27) şi (14.29) pentru condiţia de acţionare; caracteristica de acţionare constituie deci reprezentarea în planul complex a curbei corespunzătoare relaţiilor:

$$Z = Z_{pp} \tag{14.30}$$

sau:

$$Z_r = Z_{pr}, \tag{14.31}$$

respectiv:

$$\frac{U_r}{I_r} = Z_{pr}. \tag{14.32}$$

Cînd condiţiile de acţionare sînt îndeplinite la limită (cazul egalităţii), releele de impedanţă se găsesc la limita de acţionare; considerînd ca exemplu cazul releelor electromecanice, în această situaţie limită are loc egalitatea cuplului motor cu cuplul rezistent.

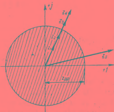


Fig. 14.5. Caracteristica de acţionare circulară cu centrul în origine.

Reprezentarea grafică a relaţiei (14.30) în planul complex conduce la un cerc cu centrul în origine şi cu raza egală cu Z_{pp} (fig. 14.5), care constituie caracteristica de acţionare a protecţiei. Reprezentarea grafică a relaţiei (14.31) conduce tot la un cerc cu centrul în origine, cu raza egală cu Z_{pr}, constituind caracteristica de acţionare a releului de impedanţă.

Din figura 14.5 rezultă că planul complex este împărţit în două zone de caracteristica de acţionare: *zona I*, din interiorul cercului (haşurată) şi zona *II*, din exteriorul cercului.

Zona I reprezintă zona de acţionare. Astfel, pentru orice scurtcircuit căruia îi corespunde o impedanţă $\underline{Z}$ (sesizată de protecţie) reprezentată printr-un vector complex cu vîrful în zona I, protecţia acţionează, întrucît modulul vectorului complex:

$$Z = |\underline{Z}| \tag{14.33}$$

este mai mic decît raza cercului (egală cu Z_{pp}) şi deci condiţia (2.19) este îndeplinită. De exemplu, vectorii complecşi $\underline{Z}_1$ şi $\underline{Z}_2$ (fig. 14.5) corespund unor defecte la care protecţia acţionează.

În cazul unor scurtcircuite cărora le corespund impedanţe $\underline{Z}$ (sesizate de protecţie) reprezentate prin vectori complecşi cu vîrful în zona II, protecţia nu acţionează, întrucît în acest caz modulul vectorului complex $Z = |\underline{Z}|$ este mai mare decît raza cercului, deci:

$$Z = |\underline{Z}| > Z_{pp} \tag{14.34}$$

şi condiţia de acţionare (2.19) nu este îndeplinită. De exemplu, vectorii complecşi $\underline{Z}_3$ şi $\underline{Z}_4$ (fig. 14.5) corespund unor regimuri în care protecţia nu acţionează.

După cum a rezultat din relaţia (2.23) şi din figura 2.4, în cazul scurtcircuitelor nete, fără arc, modulul impedanţei $Z = |\underline{Z}|$ (sesizate de protecţie) este proporţional cu distanţa dintre defect şi locul de instalare al protecţiei. În consecinţă, vectorii complecşi $\underline{Z}_3$ şi $\underline{Z}_4$ corespund unor defecte mai depărtate de cele cărora le corespund vectorii complecşi $\underline{Z}_1$ şi $\underline{Z}_2$. Ca urmare, prin alegerea razei caracteristicii circulare de acţionare (respectiv prin alegerea impedanţei de pornire Z_{pp}, întrucît raza caracteristicii circulare este egală valoarea Z_{pp}) se delimitează şi lungimea zonei protejate, protecţia acţionînd numai la defecte în această zonă.

În absenţa defectelor, vectorul complex $\underline{Z}$ (al impedanţei sesizate de protecţie) are, de asemenea, vîrful în zona II, întrucît în regimurile normale tensiunea U are valori ridicate şi curentul I are valori mult mai reduse decît în cazul scurtcircuitelor, deci impedanţa $Z = \frac{U}{I}$ are valori sensibil mai mari decît la scurtcircuite. Vectorul complex $\underline{Z}_s$ (fig. 14.5) corespunde unui regim de sarcină normală.

Pe lîngă caracteristicile circulare cu centrul în originea planului complex, pentru elementele de măsură ale protecţiilor de distanţă se folosesc şi alte caracteristici de acţionare: caracteristica circulară deplasată, cu centrul pe axa reală (fig. 14.6), caracteristica circulară trecînd prin origine (fig. 14.7),

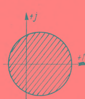


Fig. 14.6. Caracteristica circulară deplasată cu centrul pe axa reală.

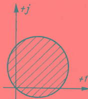


Fig. 14.7. Caracteristica circulară trecînd prin origine.

caracteristica circulară deplasată (fig. 14.8), caracteristica în formă de elipsă (fig. 14.9), caracteristica poligonală (fig. 14.10), caracteristici formate cu ajutorul a două cercuri (figurile 14.11 și 14.12).

Caracteristicile poligonale și cele formate cu ajutorul a două cercuri, avantajoase din punct de vedere al siguranței și sensibilității, sînt de regulă realizate de relee electronice de impedanță.

5. Realizarea caracteristicilor de acționare ale releelor de impedanță

Pentru ilustrarea realizării caracteristicii circulare cu centrul în origine, în figura 14.13 este reprezentat simplificat un releu de impedanță electromagnetic. Bobina de curent w_1 este alimentată de transformatorul de curent *TC*, iar bobina de tensiune w_2 este alimentată de transformatorul de tensiune *TT*. Prin bobina de curent circulă curentul I_r, care dă naștere cuplului C_1 (acționînd asupra pîrghiei *P* în sensul închiderii contactelor *C*), iar prin bobina de tensiune, alimentată cu tensiunea $\underline{U}_r$, circulă curentul $\underline{I}_u$, care dă naștere cuplului C_2, acționînd în sens opus închiderii contactelor *C*.

Curentul I_u este proporțional cu tensiunea U_r, deci:

$$I_u = K'U_r, \tag{14.35}$$

unde K' este un coeficient de proporționalitate.

Cele două cupluri C_1 și C_2 sînt proporționale cu pătratul curenților din bobinele w_1 și w_2, respectiv:

$$C_1 = K_1 I_r^2 \tag{14.36}$$

și

$$C_2 = K'' I_u^2. \tag{14.37}$$

Înlocuind în relația (14.37) valoarea curentului I_u din expresia (14.35) se obține:

$$C_2 = K''K'^2 U_r^2 = K_2 U_r^2, \tag{14.38}$$

unde s-a notat $K''K'^2 = K_2$.

La limita de acționare a releului de impedanță, cînd vectorul complex al impedanței se găsește cu vîrful chiar pe caracteristica circulară și au loc relațiile (14.30), (14.31) și (14.32), cele două cupluri sînt egale (neglijînd acțiunea cuplului unui resort antagonist, care nu este reprezentat în figura 14.13), deci:

$$C_1 = C_2. \tag{14.39}$$

Înlocuind în relația (14.39) expresiile cuplurilor din relațiile (14.36) și (14.38), se obține:

$$K_1 I_r^2 = K_2 U_r^2,$$

respectiv:

$$\frac{U_r}{I_r} = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}. \tag{14.40}$$

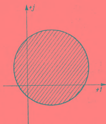


Fig. 14.8. Caracteristica circulară deplasată.

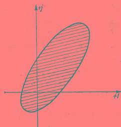


Fig. 14.9. Caracteristica în formă de elipsă.

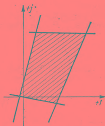


Fig. 14.10. Caracteristica poligonală.

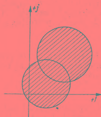


Fig. 14.11. Caracteristica formată prin reuniunea a două cercuri.

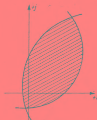


Fig. 14.12. Caracteristica formată prin intersecția a două cercuri.

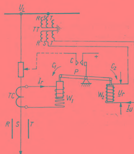


Fig. 14.13. Releu de impedanță electromagnetic.

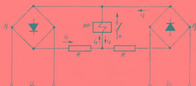


Fig. 14.14. Releu de impedanță cu curenți redresați.

Din relațiile (14.22) și (14.40) rezultă că la limita de acționare are loc egalitatea:

$$Z_r = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}, \quad (14.41)$$

iar din relațiile (14.31) și (14.41), valabile pentru limita de acționare a releului de impedanță, rezultă expresia impedanței de pornire a releului:

$$Z_{pr} = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}. \quad (14.42)$$

Caracteristica circulară cu centrul în origine poate fi obținută și prin intermediul unui releu de impedanță funcționînd cu curenți redresați, de exemplu un releu polarizat (fig. 14.14). Puntea de redresare P_1 este alimentată cu o tensiune $\underline{U}_1$, proporțională cu curentul $\underline{I}_r$, deci:

$$\underline{U}_1 = K_1' \underline{I}_r \quad (14.43)$$

(unde K_1' este un factor de proporționalitate, de dimensiunea unei rezistențe) iar puntea de redresare P_2 este alimentată cu o tensiune $\underline{U}_2$, proporțională cu tensiunea $\underline{U}_r$, deci:

$$\underline{U}_2 = K_2' \underline{U}_r, \quad (14.44)$$

unde K_2' reprezintă un alt coeficient de proporționalitate.

Din relațiile (14.43) și (14.44) se obțin pentru module expresiile:

$$U_1 = K_1' I_r \quad (14.45)$$

și

$$U_2 = K_2' U_r. \quad (14.46)$$

Curenții redresați i_1 și i_2 circulă în sensuri opuse prin bobina releului polarizat RP, care acționează numai dacă curentul rezultant prin bobină are sensul curentului i_1, deci dacă este satisfăcută condiția:

$$i_1 \geqslant i_2, \quad (14.47)$$

la limita de acționare a releului de impedanță avînd loc relația de egalitate:

$$i_1 = i_2. \quad (14.48)$$

Curenții i_1 și i_2, debitați de cele două punți de redresare, sînt proporționali cu tensiunile aplicate punților, deci:

$$i_1 = K_1'' U_1 \quad (14.49)$$

și

$$i_2 = K_2'' U_2, \quad (14.50)$$

unde K_1'' și K_2'' sînt factori de proporționalitate.

Înlocuind în relațiile (14.49) și (14.50) expresiile tensiunilor U_1 și U_2 din relațiile (14.45) și (14.46), se obține:

$$i_1 = K_1'' K_1' I_r = K_a I_r, \tag{14.51}$$

$$i_2 = K_2'' K_2' U_r = K_b U_r, \tag{14.52}$$

unde s-a notat $K_1'' K_1' = K_a$ și $K_2'' K_2' = K_b$.

Expresiile (14.51) și (14.52) ale curenților se înlocuiesc în condiția (14.48), la limita de acționare rezultînd relația:

$$K_a I_r = K_b U_r, \tag{14.53}$$

respectiv:

$$\frac{U_r}{I_r} = \frac{K_a}{K_b}. \tag{14.54}$$

Avînd în vedere relațiile (14.22) și (14.54), condiția acționării la limită capătă forma:

$$Z_r = \frac{K_a}{K_b}. \tag{14.55}$$

iar din relațiile (14.31) și (14.55) rezultă expresia impedanței de pornire a releului:

$$Z_{pr} = \frac{K_a}{K_b}.$$

Rezistențele R din schema din figura 14.14 au rolul de separare, pentru a împiedica circulația prin cealaltă punte a curentului redresat de fiecare punte.

Dacă în locul releului polarizat RP se conectează un amplificator electronic detector de polaritate, se obține un releu electronic de impedanță.

6. Schema de elemente a protecțiilor de distanță

Din cele expuse anterior, rezultă că protecția de distanță este o protecție complexă, conținînd elemente de pornire, de măsură, direcționale, de timp și de blocare. În figura 14.15 este ilustrat aspectul schemei de elemente a protecțiilor de distanță.

Blocul elementelor de pornire EP conține de regulă trei relee de impedanță minimă (cîte unul pe fiecare fază) și un releu de curent homopolar. Elementele de pornire au rolul de a sesiza apariția unui defect în rețeaua electrică și de a determina fazele afectate de defect, comandînd în mod corespunzător elementele de comutare EC_1 și EC_2, care asigură alimentarea corectă a elementului direcțional ED și a elementului de măsură EM cu tensiunile U_{rd} și U_r și curenții I_{rd} și I_r, corespunzători fazelor afectate de defect. Tensiunea U_r este aplicată elementului de măsură EM prin intermediul elementului de timp ET (comandat tot de elementele de pornire EP), care asigură obținerea caracteristicii de timp din figura 14.3.

Transmiterea comenzilor de la elementele de pornire EP la elementele de comutare EC_1 și EC_2 și la elementul de timp ET este reprezentată simbolic prin săgeți în figura 14.15.

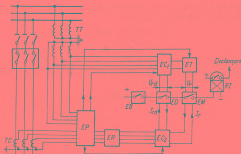


Fig. 14.15. Schema de elemente a protecţiilor de distanţă.

Elementele de pornire sînt alimentate cu tensiunile tuturor fazelor de la transformatorul de tensiune TT şi cu curenţii tuturor fazelor de la transformatoarele de curent TC. Elementul de comutare EC_1, care efectuează comutarea tensiunilor, este alimentat de la transformatorul de tensiune TT cu tensiunile tuturor fazelor, aplicînd elementului direcţional ED şi elementului de măsură EM (prin intermediul elementului de timp ET) tensiunile corespunzătoare fazelor afectate de defect.

Elementul de comutare EC_2 este alimentat de la transformatoarele de curent TC prin intermediul elementului cu rezistenţe ER, care conţine patru rezistenţe: trei rezistenţe egale (cîte una pe fiecare fază) şi o rezistenţă reglabilă, parcursă de componenta homopolară a curentului. Cu ajutorul elementului cu rezistenţe ER se obţin căderi de tensiune proporţionale cu curenţii din diferitele faze şi cu componenta homopolară a curentului. Aceste căderi de tensiune pot fi comutate de elementul de comutare EC_2 (pentru a se aplica elementelor ED şi EM căderile de tensiune corespunzătoare fazelor afectate de defect), în timp ce în circuitele secundare ale transformatoarelor de curent nu pot fi admise comutări sau întreruperi, întrucît există pericolul unor creşteri de tensiune; în scopul posibilităţii unor comutări în circuitele de curent, a fost introdus elementul cu rezistenţe ER.

Alimentarea elementelor ED şi EM cu tensiuni şi curenţi corespunzători fazelor afectate de defect asigură o sensibilitate ridicată a protecţiei de distanţă, în condiţiile folosirii unui singur element direcţional şi a unui singur element de măsură în cadrul schemei.

La unele tipuri de protecţii de distanţă se folosesc trei elemente direcţionale şi trei sau şase elemente de măsură (trei dintre acestea sînt prevăzute pentru defecte monofazate, iar celelalte trei sînt prevăzute pentru defecte între faze); la aceste tipuri numărul de comutări este considerabil mai redus decît în varianta cu cîte un element direcţional şi de măsură.

Elementele direcţionale ED, de măsură EM şi de timp ET asigură selectivitatea lichidării defectelor.

Elementele de blocare din cadrul blocului EB împiedică acţionări greşite ale protecţiei la defecte în circuitele transformatoarelor de tensiune sau la pendulări în sistemul electroenergetic, deci asigură siguranţa funcţionării protecţiei de distanţă.

Din schemă se constată că pentru acționarea releului intermediar *RI* și transmiterea comenzii de declanșare a întrerupătorului este necesar ca elementele *EB*, *ED* și *EM* să permită transmiterea semnalelor; ca urmare, este necesară acționarea elementelor direcțional și de măsură, precum și absența unei acțiuni de blocare (împiedicare a acționării) exercitate de elementele de blocare.

7. Protecții de distanță cu transmiterea unor semnale la capătul opus al liniei

Prezența unor porțiuni în care defectele nu sînt lichidate rapid de la ambele capete ale liniei, după cum rezultă din figura 14.4, constituie un dezavantaj al protecțiilor de distanță. În unele rețele complexe de tensiuni înalte și foarte înalte (220—400 kV) lichidarea temporizată a unui defect poate periclita stabilitatea sistemului electric și de aceea nu este admisibilă.

În asemenea cazuri se folosesc protecții de distanță cu transmiterea unor semnale între protecțiile de la cele două capete, obținîndu-se prelungirea treptei rapide a ambelor protecții pe toată lungimea liniei. Această operație este denumită uneori „interdeclanșare". Ținînd seamă de lungimea mare a liniilor din rețelele de tensiuni înalte și foarte înalte, transmiterea semnalelor între protecțiile de distanță de la capetele liniei se realizează printr-un canal de înaltă frecvență cu care este echipată linia respectivă.

Datorită interdeclanșării se asigură lichidarea rapidă, de la ambele capete ale liniei, a oricărui defect apărut, deci sînt eliminate porțiunile în care defectele sînt lichidate temporizat de la unul din capetele liniei.

Astfel, de exemplu, la un defect în porțiunea *DP* a liniei a doua (fig. 14.4) protecția *3* acționează rapid și o dată cu comanda declanșării întrerupătorului din locul de instalare al protecției *3*, transmite prin canalul de înaltă frecvență o comandă de declanșare a întrerupătorului de la capătul opus al liniei, defectul fiind astfel lichidat rapid de la ambele capete ale liniei.

În absența interdeclanșării, protecția *4* ar fi comandat declanșarea întrerupătorului propriu cu temporizarea treptei a doua, întrucît defectul se găsește în afara zonei *I* (rapide) a caracteristicii de timp a protecției *4*.

Protecțiile de distanță cu interdeclanșare au avantajul lichidării rapide și selective a defectelor apărute în orice punct al liniei protejate, dar costul lor este mai ridicat decît al protecțiilor de distanță fără interdeclanșare, datorită canalului de înaltă frecvență.

8. Protecții de distanță elaborate la noi în țară

La noi în țară au fost elaborate (la catedra de Automatică I a Institutului Politehnic București) protecțiile de distanță *RDT-1* și *RDT-2*, realizate cu blocuri electronice tranzistorizate.

La ICEMENERG au fost elaborate protecțiile de distanță *PD1* (pentru linii de medie tensiune), *PD2* și *PD3* (pentru linii de tensiuni înalte).

În protecția *PD1* elementele de pornire sînt constituite de trei relee maximale de curent, care controlează valorile curenților din fazele *R* și *T* și valoa-

rea componentei homopolare I_0. Protecţia conţine un element de măsură realizat ca releu electronic tranzistorizat de impedanţă, iar caracteristica de timp are 3 trepte şi este realizată de un releu de timp electromagnetic, de tip *RTp-5*.

Protecţiile *PD2* şi *PD3* au pentru pornire trei relee minimale de impedanţă şi un releu maximal de curent, care controlează valoarea componentei homopolare I_0.

B. PROTECŢIA DIFERENŢIALĂ LONGITUDINALĂ

1. Particularităţile protecţiei diferenţiale longitudinale a liniilor

Protecţia diferenţială longitudinală are marele avantaj de a fi selectivă, şi deci nu necesită introducerea unor elemente suplimentare pentru asigurarea selectivităţii; ca urmare, această protecţie poate fi realizată ca protecţie rapidă, acţionînd fără temporizare la defecte apărute pe întreaga lungime a zonei protejate. Din acest punct de vedere, protecţia diferenţială longitudinală a liniilor din reţelele complexe este mai avantajoasă decît protecţia de distanţă, care asigură lichidarea rapidă a defectelor numai pe o anumită porţiune a liniei protejate. În schimb, protecţia diferenţială longitudinală necesită stabilirea unei legături între transformatoarele de curent de la capetele zonei protejate, pentru realizarea circuitului diferenţial, în timp ce la protecţia de distanţă această legătură nu este necesară.

Protecţia diferenţială longitudinală a liniilor se bazează pe acelaşi principiu ca şi protecţia diferenţială longitudinală a generatoarelor, transformatoarelor, blocurilor şi barelor colectoare, însă prezintă o serie de particularităţi. Aceste particularităţi se datoresc faptului că în cazul liniilor lungimea zonei protejate este mult mai mare decît în cazul tuturor celorlalte instalaţii menţionate.

Ca urmare, apar dificultăţi în realizarea legăturii dintre transformatoarele de curent de la cele două capete ale liniei. Astfel, numai în cazul unor linii foarte scurte, de cel mult cîteva sute de metri — cum sînt liniile de alimentare a serviciilor interne din centralele electrice — circuitul diferenţial se poate realiza ca şi la celelalte tipuri de instalaţii protejate; în celelalte cazuri, lungimea şi impedanţa mare a conductoarelor din circuitul diferenţial impun măsuri suplimentare în realizarea acestui circuit, întrucît fără aceste măsuri impedanţa mare din circuitul secundar al transformatoarelor de curent determină apariţia unor erori inadmisibile.

Micşorarea impedanţei — în condiţiile creşterii lungimii — ar necesita creşterea secţiunii conductoarelor circuitului diferenţial pînă la valori total neeconomice, care s-ar apropia de valorile secţiunii conductoarelor liniei protejate.

Măsurile suplimentare permit realizarea unor protecţii diferenţiale cu conductoare de legătură (pentru obţinerea circuitului diferenţial) pentru linii cu lungimea pînă la 20 km.

În cazul liniilor de lungimi mai mari, protecţiile bazate pe principiul diferenţial se realizează cu ajutorul unor semnale de înaltă frecvenţă transmise

între cele două capete ale liniei (fără să se mai instaleze conductoare de legătură pentru realizarea unui circuit diferențial), rezultînd astfel protecții prin înaltă frecvență.

2. Variante de realizare

În figura 14.16 este reprezentată schema monofilară a protecției diferențiale longitudinale pentru linii scurte (pînă la cîteva sute de metri lungime), realizată ca și la generatoare, transformatoare, blocuri, bare colectoare. Releele protecției sînt instalate în stația S_1: cele trei relee de intensitate *1*, conectate în paralel în circuitele diferențiale formate cu transformatoarele de curent *TC* — în schema monofilară din figura 14.16 apare un singur releu *1* și un singur circuit diferențial — și releul intermediar *2*, care comandă declanșarea întrerupătoarelor de la cele două capete ale liniei.

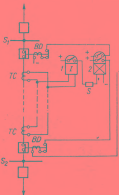


Fig. 14.16. Schema monofilară a protecției diferențiale longitudinale pentru linii foarte scurte.

Tot în stația S_1 este instalată și bateria de acumulatoare care alimentează circuitele de curent continuu, inclusiv circuitele celor două bobine de declanșare *BD*.

Se constată că în această variantă este necesar să se instaleze de-a lungul liniei șase conductoare de legătură pentru realizarea protecției: patru conductoare pentru obținerea circuitelor diferențiale aferente celor trei faze, ca în schema trifilară din figura 8.6 (în schema monofilară din fig. 14.16 apar două asemenea conductoare), și două conductoare pentru circuitul de curent operativ continuu alimentat de bateria din stația S_1, prin care se transmite comanda de declanșare a întrerupătorului din stația S_2.

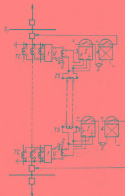
Pentru linii mai lungi, însă pînă la 20 km (la lungimi mai mari fiind folosite protecții prin înaltă frecvență), se adoptă măsuri suplimentare în realizarea protecției diferențiale longitudinale.

În primul rînd, transformatoarele de curent *TC* de pe cele trei faze alimentează filtre de componente simetrice (filtrele *1* din schema trifilară reprezentată în fig. 14.17), care au o tensiune de ieșire $\underline{U}$ proporțională cu o combinație fazorială a componentelor de secvență directă ($\underline{I}_1$) și homopolară ($\underline{I}_0$) ale curentului, de exemplu:

$$\underline{U} = k'(\underline{I}_1 + k\underline{I}_0), \tag{14.56}$$

unde k' și k sînt coeficienți de proporționalitate.

În regim normal sau de scurtcircuit exterior, cele două tensiuni de la ieșirea filtrelor *1* sînt egale și, ca urmare, prin bobinele de lucru *L* ale releelor *3* — conectate în derivație în circuitul diferențial — nu circulă decît un curent de dezechilibru. La un scurtcircuit pe linia protejată, egalitatea menționată nu mai are loc și prin bobinele de lucru *L* circulă curenți de valoare importantă, determinînd acționarea releelor *3*, care prin releele intermediare *4* comandă declanșarea întrerupătoarelor. Datorită folosirii


Fig. 14.17. Schema trifilară a protecției diferențiale longitudinale pentru linii de 5–20 km lungime.

filtrelor *1*, în loc de patru conductoare sînt necesare numai două conductoare pentru realizarea circuitului diferențial.

În al doilea rînd, în schemă sînt introduse transformatoarele suplimentare *TS*, care determină micșorarea impedanței din secundarul transformatoarelor de curent *TC*; ca urmare, chiar la lungimi de 5 — 20 km ale conductoarelor care formează circuitul diferențial — și la creșteri corespunzătoare ale impedanței acestor conductoare — impedanța din secundarul transformatoarelor *TC* rămîne în limite admisibile din punctul de vedere al erorilor.

În al treilea rînd, prin instalarea a două grupuri de relee — cîte unul la fiecare capăt al liniei protejate, care comandă declanșarea întreruptorului de la capătul respectiv — se elimină necesitatea celor două conductoare de legătură pentru circuitul de curent operativ continuu. Rămîn astfel necesare numai două conductoare, ceea ce conduce la o ieftinire sensibilă a soluției din figura 14.17; datorită acestei ieftiniri, varianta din figura 14.17 poate fi utilizată pînă la lungimile de linii menționate (5—20 km).

Pentru mărirea sensibilității protecției în schema din figura 14.17 sînt utilizate transformatoarele cu saturație rapidă (notate cu *2* pe schemă) și releele *3* care au și bobine de frînare *F*; transformatoarele cu saturație rapidă *2* sînt prevăzute cu mai multe borne ale bobinajului primar și comutarea conexiunii la aceste borne permite reglarea valorii curentului de pornire al releelor *3*.

La noi în țară se fabrică, la ICEMENERG, relee diferențiale electronice pentru linii *RDL*. Acestea sînt prevăzute cu transformatoare sumatoare care transformă sistemul trifazat de curenți (debitați de transformatoarele de curent de pe cele trei faze) într-un sistem monofazat, fiind astfel suficiente numai două conductoare pentru realizarea circuitului diferențial. Acțiunea de frînare este realizată prin intermediul unei punți de redresare (puntea de frînare) care alimentează amplificatorul electronic detector de polaritate cu un curent de sens opus curentului cu care o a doua punte (puntea de lucru) alimentează același amplificator.

C. PROTECȚIA DIFERENȚIALĂ TRANSVERSALĂ A LINIILOR PARALELE

1. Principii de realizare

Aceste protecții se realizează prin controlul diferenței fazoriale a curenților din cele două linii paralele; în regim normal sau de scurtcircuit exterior rezultă relațiile (2.15) și (2.16), iar în cazul unui scurtcircuit pe una din linii rezultă relația (2.17).

Controlul diferenței curenților respectivi se realizează cu ajutorul unor circuite diferențiale transversale analoage cu cel din figura 8.9, obținute prin conectarea corespunzătoare a bornelor bobinajelor secundare ale transformatoarelor de curent; asemenea circuite diferențiale transversale se realizează la ambele capete ale celor două linii paralele (pe două sau pe trei faze, după cum liniile fac parte din rețele cu curenți mici sau cu curenți mari de punere la pămînt), iar prin releele de curent, montate în derivație cu circuitele diferențiale, circulă diferența fazorială a curenților secundari ai transformatoarelor de curent de pe cele două linii.

Conform condiției de selectivitate, la un defect pe una din linii protecția trebuie să comande numai declanșarea întrerupătoarelor acestei linii, iar cealaltă linie trebuie să rămînă în funcțiune. Pentru obținerea unei asemenea funcționări selective, în schema protecției diferențiale transversale se introduc relee direcționale.

2. Schema monofilară

În figura 14.18 este reprezentată schema monofilară a protecției diferențiale transversale a liniilor paralele *L-1* și *L-2*. În stația S_1 sînt instalate grupurile de relee *1*, *2* și *3*, ca și releele intermediare RI_1 și RI_2, iar în stația S_2 sînt instalate grupurile de relee *1'*, *2'* și *3'* (în reprezentarea monofilară, apare cîte un singur releu *1*, *2*, *3*, *1'*, *2'*, *3'*) și releele intermediare RI_3 și RI_4.

Releele de intensitate *3* și *3'* și bobinele de curent ale releelor direcționale *1*, *2*, *1'* și *2'* sînt conectate în paralel cu circuitele diferențiale transversale; bobinele de tensiune ale releelor direcționale *1* și *2*, respectiv *1'* și *2'* sînt alimentate astfel încît reele *1* și *2*, respectiv *1'* și *2'*, să acționeze la sensuri (convenționale) opuse ale curenților prin bobinele de curent, sensurile corespunzătoare acționării fiind indicate printr-o săgeată în interiorul releelor direcționale.

Releele de curent au rolul de elemente de pornire, iar releele direcționale asigură selectivitatea; releele *1* și 1' comandă — prin releele intermediare RI_1 și RI_3 — declanșarea întrerupătoarelor *I — 1* și *I — 3* ale liniei *L — 1*, iar releele *2* și *2'* — prin releele intermediare RI_2 și RI_4— comandă declanșarea întrerupătoarelor *I — 2* și *I — 4* ale liniei *L — 2*.

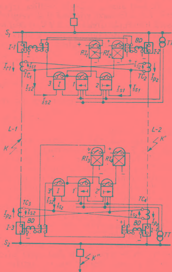


Fig. 14.18. Schema monofilară a protecției diferențiale transversale pentru linii paralele.

Pentru ilustrarea funcționării selective se consideră un scurtcircuit în punctul K pe linia *L-1*, în ipoteza că liniile sînt alimentate numai dinspre stația S_1, iar la stația S_2 sînt racordați consumatori. Defectul este alimentat prin linia *L-1* (curentul $\underline{I}_{p1}$) și prin linia *L-2* și o porțiune a liniei *L-1* (curentul $\underline{I}_{p2}$), sensurile convenționale ale curenților fiind indicate în figura 14.18; pe aceeași schemă sînt indicate și sensurile convenționale ale curenților secundari ($\underline{I}_{s1}$ și $\underline{I}_{s2}$), rezultînd că prin bobina releului *3* circulă diferența acestor curenți $\underline{I}_{s1} - \underline{I}_{s2}$, iar prin bobina releului *3'* circulă un curent egal cu $2\,\underline{I}_{s2}$.

Impedanța circuitului prin care circulă curentul $\underline{I}_{p1}$ fiind sensibil mai mică decît a circuitului prin care circulă curentul $\underline{I}_{p2}$ (datorită lungimii diferite a celor două circuite), rezultă:

$$I_{p1} > I_{p2}, \tag{14.57}$$

deci

$$I_{s1} > I_{s2} \tag{14.58}$$

și diferența curenților $\underline{I}_{s1} - \underline{I}_{s2}$ are sensul convențional al curentului $\underline{I}_{s1}$.

Din figura 14.18 rezultă că acționează releele *3* și *1*, respectiv *3'* și *1'* — în conformitate cu sensurile convenționale ale curenților prin bobinele de curent ale releelor direcționale — fiind comandate releele RI_1 și RI_3 și declanșarea întrerupătoarelor *I-1* și *I-3*; defectul este astfel lichidat selectiv, ieșind din funcțiune numai linia defectă *L-1*.

În mod analog se poate verifica faptul că la un defect în punctul K' pe linia *L-2* acționează releele *3* și *2*, respectiv *3'* și *2'*, fiind comandată declanșarea întrerupătoarelor *I-2* și *I-4*, și deci rezultînd o lichidare selectivă a defectului prin ieșirea din funcțiune a liniei *L-2*.

La un scurtcircuit exterior, de exemplu în punctul K'', rezultă:

$$\underline{I}_{p1} = \underline{I}_{p2} \tag{14.59}$$

și

$$\underline{I}_{s1} = \underline{I}_{s2}, \tag{14.60}$$

curenții prin bobinele releelor *3* și *3'* avînd valorile:

$$I_{s1} - I_{s2} = I_{dez}, \tag{14.61}$$

deci valori reduse.

În acest caz, nici una dintre protecții nu acționează, elementele de pornire *3* și *3'* rămînînd cu contactele deschise.

În schema din figura 14.18, legătura contactelor releelor *3* și *3'* la borna pozitivă a bateriei de acumulatoare se face printr-un circuit în care sînt intercalate contactele auxiliare ale ambelor întrerupătoare din stația respectivă (contactele auxiliare ale întrerupătoarelor *I-1* și *I-2* în circuitul contactului releului *3* și contactele auxiliare ale întrerupătoarelor *I-3* și *I-4* în circuitul contactului releului 3'). Această măsură are ca scop să blocheze protecțiile din ambele stații atunci cînd una din linii iese din funcțiune, pentru a împiedica acționări greșite care ar comanda declanșarea întrerupătoarelor celeilalte linii.

De exemplu, în cazul unui scurtcircuit în punctul K pe linia *L-1* protecția transmite comandă de declanșare întrerupătoarelor *I-1* și *I-3*; din schemă rezultă că prin deschiderea contactelor auxiliare ale acestor întrerupătoare se întrerup circuitele de curent operativ continuu pentru contactele releelor *3* și *3'*, și deci o acționare greșită ulterioară a protecției nu mai este posibilă. În absența blocajului descris ar fi existat pericolul ca după ieșirea din func-

ţiune a liniei *L-1* să aibă loc o acţionare greşită a protecţiei cu comanda declanşării întrerupătoarelor liniei *L-2*.

Într-adevăr, după ieşirea din funcţiune a liniei *L-1* curentul devine nul prin transformatoarele de curent TC_1 şi TC_3, iar curentul prin transformatoarele TC_2 şi TC_4 capătă o valoare însemnată, corespunzătoare unui regim de sarcină maximă pentru linia *L-2*, care preia şi sarcina liniei *L-1*; pentru protecţia din staţia S_1, un asemenea raport între curenţii primari ai transformatoarelor de curent TC_1 şi TC_2 apare şi la un scurtcircuit pe linia *L-2* — de exemplu în punctul K' — şi, ca urmare, releele *3*, *2* şi RI_2 acţionează, comandînd greşit declanşarea întrerupătorul *I-2* şi ieşirea din funcţiune a liniei *L-2*. Blocajul realizat prin contactele auxiliare ale întrerupătoarelor împiedică o asemenea acţionare greşită, întrucît circuitul de curent operativ continuu al protecţiei din staţia S_1 se întrerupe după declanşarea întrerupătorului *I-1* şi, în consecinţă, închiderea contactelor releelor *3* şi *2* nu mai poate comanda acţionarea releului RI_2, deci nici declanşarea întrerupătorului *I-2*.

Se constată că protecţia diferenţială a liniilor paralele poate funcţiona corect numai cînd ambele linii sînt în funcţiune, deci sînt necesare şi alte protecţii ale liniilor, pentru eventualitatea că rămîne în funcţiune o singură linie. Acest lucru reprezintă un important dezavantaj al protecţiilor diferenţiale transversale.

D. PROTECŢIA COMPARATIVĂ A LINIILOR

În reţelele complexe, lichidarea rapidă a defectelor pe toată lungimea liniei protejate poate fi asigurată prin intermediul unei protecţii care compară sensurile convenţionale de circulaţie a curenţilor de la cele două capete ale liniei protejate, pentru comparaţie fiind folosite relee direcţionale. Protecţiile de acest tip sînt denumite protecţii comparative.

Principiul de funcţionare este asemănător cu cel al protecţiilor maximale de curent direcţionale. Pentru a rezulta o acţionare rapidă, netemporizată, a defecte în orice punct al liniei protejate este necesar să se realizeze o legătură între protecţiile de la cele două capete ale liniei.

La liniile de lungimi mici această legătură se realizează prin conductoare auxiliare de legătură, protecţiile comparative respective fiind denumite protecţii secţionale. În figura 14.19 este reprezentată simplificat, pentru o singură fază, schema unei protecţii secţionale.

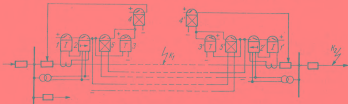


Fig. 14.19. Schema protecţiei secţionale a liniilor.

Releele maximale de curent *1,1'*, releele direcționale *2,2'*, releele de timp *3, 3'* și releele intermediare *4,4'* intervin în schemele protecțiilor maximale de curent direcționale ale liniilor, după cum rezultă și din schema trifilară din figura 13.7, corespunzătoare protecției de la unul din capetele liniei. Releele intermediare *5,5'*, comandate de releele direcționale de la capetele opuse ale liniei (prin conductoarele auxiliare de legătură, reprezentate prin linii întrerupte), sînt introduse pentru realizarea protecției secționale și transmit fără temporizare comanda de declanșare a întrerupătoarelor.

Selectivitatea protecției este asigurată de faptul că în cazul unui scurtcircuit într-o rețea electrică, numai pe linia defectă acționează releele direcționale de la ambele capete, după cum rezultă și din figura 13.6, *a*.

În cazul unui scurtcircuit pe o linie prevăzută cu protecție secțională, de exemplu în punctul K_1 (fig. 14.19), acționează releele de curent *1, 1'* și releele direcționale *2, 2'*, iar acestea din urmă comandă, prin conductoarele auxiliare de legătură, acționarea releelor intermediare *5, 5'* (aflate la capetele opuse ale liniei). Prin releele *4, 4'*, releele *5, 5'* comandă fără temporizare declanșarea întrerupătoarelor liniei și lichidarea rapidă a defectului.

Dacă defectul este exterior, de exemplu în K_2, atunci acționează releele de curent *1,1'* și grupul de relee direcționale *2* (în schema trifilară intervin mai multe relee *2*), dar grupul de relee direcționale *2'* nu acționează și ca urmare releul *5* rămîne cu contactul deschis. Datorită acestui fapt, grupul de relee direcționale *2* nu poate comanda netemporizat releul *4* și declanșarea întrerupătorului (cum a fost cazul la defectul din punctul K_1), ci comandă releul de timp *3*.

Dacă defectul exterior, din punctul K_2, nu este lichidat selectiv de protecția liniei vecine pe care a apărut, atunci după trecerea temporizării releului *3* acesta își va închide contactul și va comanda acționarea releului *4* și declanșarea întrerupătorului, fiind astfel asigurată o rezervă a protecției liniei vecine în cazul cînd aceasta nu asigură lichidarea defectului din punctul K_2.

În schemă intervin și alte relee intermediare, care nu sînt reprezentate în figura 14.19 și care permit ca legătura dintre protecțiile de la capetele liniei să se realizeze numai prin două conductoare auxiliare, în locul celor patru conductoare din figura 14.19.

În rețeaua de cabluri a orașului București sînt folosite protecții secționale.

E. PROTECȚII PRIN ÎNALTĂ FRECVENȚĂ

1. Canale de înaltă frecvență

La liniile de lungimi mari (peste 20 km) legătura dintre protecțiile de la cele două capete, necesară în cazul protecțiilor diferențiale longitudinale și în cazul protecțiilor comparative, nu se mai realizează prin conductoare de legătură, întrucît costul acestora devine foarte ridicat. Din punct de vedere tehnico-economic devine mai avantajoasă realizarea acestei legături prin curenți de înaltă frecvență, rezultînd protecții prin înaltă frecvență.

Canalele de înaltă frecvență se realizează în prezent în două variante: prin intermediul conductoarelor liniei de înaltă tensiune sau canale radio.

Schema unui canal de înaltă frecvenţă care utilizează conductorul *1* al unei faze a liniei protejate este reprezentată în figura 14.20. Întrucît aparatajul de înaltă frecvenţă este conectat între o fază a liniei şi pămînt, canalul de înaltă frecvenţă este de tip „fază-pămînt" (spre deosebire de alte categorii de canale de înaltă frecvenţă, care sînt de tip „fază-fază"). Semnalele de înaltă frecvenţă circulă prin conductorul *1* şi prin pămînt.

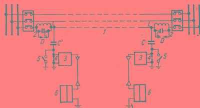


Fig. 14.20. Schema unui canal de înaltă frecvenţă prin conductorul liniei.

Circuitul de blocaj *2*, format din inductanţa *L* în paralel cu capacitatea *C*, este acordat la rezonanţă pentru frecvenţă înaltă *f*, cuprinsă între 50 000 şi 300 000 Hz. La această frecvenţă circuitul *2* are o impedanţă foarte mare (de cel puţin 1000 Ω) împiedicînd astfel trecerea semnalelor de înaltă frecvenţă din conductorul *1* spre barele staţiilor. Datorită montării circuitelor de blocaj *2*, semnalele de înaltă frecvenţă circulă numai între dispozitivele de emisie-recepţie *6*.

După circuitele de blocaj *2* sînt conectate în derivaţie condensatoarele *C'*, care pentru curenţii de frecvenţă industrială de 50 Hz au o impedanţă foarte mare, de circa 1 200 000 Ω, iar pentru semnalele de înaltă frecvenţă *f* au o impedanţă foarte mică, întrucît reactanţa capacitivă corespunzătoare are valoarea:

$$X_{C'} = \frac{1}{2\pi f C'}.$$

Condensatorul *C'* separă astfel linia de înaltă tensiune de dispozitivele de emisie-recepţie *6*. Condensatorul *C'* împreună cu filtrul *3* formează un filtru trece bandă, care permite să treacă numai semnalele de înaltă frecvenţă spre receptor-emiţătorul *6*, legat de filtrul *3* prin cabluri de înaltă frecvenţă.

Descărcătorul cu coarne *4* protejează instalaţia de emisie-recepţie în cazul străpungerii condensatorului *C'*, iar separatorul *5* (de legare la pămînt) se închide din considerente de protecţia muncii atunci cînd se lucrează la filtrul *3* sau la receptor-emiţătorul *6*.

Schema unui canal radio este reprezentată în figura 14.21. La capetele liniei protejate sînt instalate receptor-emiţătoarele *1*, legate prin cablurile *2* de antenele *3*.



Fig. 14.21. Schema unui canal radio.

Canalele radio au avantajul unei siguranțe mai ridicate, întrucît la canalele de înaltă frecvență care utilizează conductorul liniei de înaltă tensiune depunerile de chiciură pe linie determină o alterare importantă a transmiterii semnalelor de înaltă frecvență.

2. Tipuri de protecții prin înaltă frecvență

Protecțiile prin înaltă frecvență sînt de două tipuri: *protecții direcționale cu blocaj prin înaltă frecvență* și *protecții diferențiale de fază*.

● Principiul de funcționare al **protecțiilor direcționale cu blocaj prin înaltă frecvență** prezintă analogii cu principiul de funcționare al protecțiilor secționale, cu deosebirea că prin canalele de înaltă frecvență se transmit semnale de blocare a protecțiilor liniilor sănătoase, în timp ce la protecția secțională prin conductoarele auxiliare aferente liniei defecte se transmit comenzi de acționare a protecției de la capătul opus. Astfel, considerînd rețeaua electrică din figura 14.22, în cazul unui scurtcircuit în punctul *K* de pe linia *L-2* se constată că vor acționa releele direcționale *1*, *3*, *4* și *6*, iar releele *2* și *5* nu vor acționa, curenții avînd sensuri (convenționale) opuse săgeților din interiorul simbolului releului, săgeți care corespund sensului necesar de circulație a curentului pentru acționare.

La fiecare capăt al liniei se găsesc dispozitive de emisie-recepție, comanda de pornire a emițătoarelor fiind transmisă de releele de curent sau de tensiune ale protecției; acestea constituie elementele de pornire ale protecțiilor și sesizează apariția unui defect undeva în rețea, fără a putea localiza linia defectă (de exemplu, la scurtcircuitul din punctul *K* pot acționa și releele de curent ale unor protecții de pe alte linii, pe aceste linii curenții de scurtcircuit depășind valorile de pornire ale protecțiilor respective).

Emițătoarele, comandate de elementele de pornire, transmit semnale de înaltă frecvență atît receptorului de la același capăt al liniei, cît și receptorului de la capătul opus, iar receptoarele comandă blocarea protecției, care deci nu mai transmite semnalul de declanșare a întrerupătorului.

Schemele sînt astfel realizate încît prin acționarea releelor direcționale se transmite nu numai comanda de declanșare a întrerupătorului, ci și comanda de oprire a funcționării emițătoarelor, deci de întrerupere a semnalelor de blocare a protecției.

Ca urmare, pe linia defectă *L-2* nu se mai transmit semnale de blocare și releele direcționale comandă fără temporizare declanșarea întrerupătoarelor *I-3* și *I-4* și lichidarea defectului, iar pe liniile sănătoase *L-1* și *L-3* se transmit semnale de blocare (reele direcționale *2* și *5* nu acționează) și deci nici o protecție de pe aceste linii nu poate acționa, defectul fiind astfel lichidat selectiv. Transmiterea semnalelor de blocare prin canalele de înaltă frecvență ale liniilor *L-1* și *L-3* este reprezentată simbolic pe desen prin săgeți.

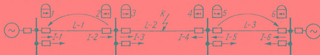


Fig. 14.22. Ilustrarea funcționării protecțiilor direcționale cu blocaj prin înaltă frecvență.

Din figura 14.22 rezultă că datorită faptului că în loc de comenzi de declanșare prin canalele de înaltă frecvență se transmit semnale de blocare, prin linia defectă *L-2* nu se transmit semnale de înaltă frecvență, aceste semnale fiind transmise numai prin liniile sănătoase *L-1* și *L-3*.

Acest fapt constituie un avantaj important al acestui tip de protecție prin înaltă frecvență, întrucît prezența unui defect pe linia de înaltă tensiune ar putea perturba și funcționarea canalului de înaltă frecvență respectiv.

● În cazul **protecțiilor diferențiale de fază,** semnalele de înaltă frecvență sînt folosite pentru compararea defazajelor curenților de la cele două capete ale liniei protejate. După cum rezultă din figura 14.22, pe liniile sănătoase *L-1* și *L-3* curenții de la cele două capete sînt în fază (respectiv au același sens convențional), iar pe linia defectă *L-2* curenții de la cele două capete sînt defazați cu circa 180°.

Compararea defazajelor celor doi curenți se efectuează prin emiterea unor impulsuri de înaltă frecvență în fiecare semiperioadă pozitivă a curenților alternativi de frecvență industrială, receptoarele comandînd declanșarea întrerupătoarelor în cazul acelei succesiuni în timp a impulsurilor, care corespunde defazajului de circa 180° între curenții de la capetele liniei, deci prezenței defectului.

În ultimii ani protecțiile diferențiale de fază au fost realizate cu tranzistoare, atît în ceea ce privește elementele de pornire, de comandă a emițătoarelor și de comparare a defazajelor, cît și în privința construcției emițătoarelor și receptoarelor.

REZUMAT

● Protecțiile de distanță conțin elemente de pornire, de măsură, de timp, direcționale și de blocare. Elementele de măsură, de timp și direcționale asigură selectivitatea protecției, iar elementele de blocare asigură siguranța protecției.

● Protecțiile de distanță au caracteristici de timp în trepte crescătoare cu creșterea impedanței măsurate *Z*.

● Releele de impedanță minimă care constituie elementele de măsură ale protecțiilor de distanță au caracteristici de acționare care se reprezintă în planul complex. Cele mai utilizate caracteristici au forme circulare, elipse, poligonale.

● Realizarea caracteristicilor de acționare ale releelor de impedanță se poate obține prin intermediul unor relee electromagnetice, relee cu curenți redresați, relee electronice etc.

● În schema de elemente a protecțiilor de distanță intervin și elemente de comutare (comandate de elementele de pornire), care asigură alimentarea corectă a circuitelor de tensiune și de curent ale elementelor direcțional și de măsură, în funcție de fazele afectate de defect. Este asigurată astfel sensibilitatea protecției.

● Pentru obținerea unei lichidări rapide, de la ambele capete ale liniei, a defectelor din orice punct al liniei protejate, protecțiile de distanță se realizează în varianta cu interdeclanșare, protecția de la fiecare capăt al liniei transmițînd (printr-un canal de înaltă frecvență) semnale protecției de la capătul opus.

● În varianta obişnuită (ca la generatoare, transformatoare, blocuri, bare colectoare), protecţia diferenţială longitudinală se foloseşte numai pentru linii scurte, de cel mult cîteva sute de metri, datorită dificultăţilor determinate de creşterea lungimii şi a impedanţei conductoarelor din circuitul diferenţial.

● Pentru linii mai lungi, pînă la 20 km, se folosesc protecţii diferenţiale longitudinale cu filtre combinate de componente simetrice sau transformatoare sumatoare (care transformă sistemul trifazat de curenţi într-un sistem monofazat) şi cu transformatoare suplimentare, care permit realizarea circuitului diferenţial cu numai două conductoare de secţiune redusă, deci o soluţie economică.

● Protecţia diferenţială transversală este destinată liniilor paralele şi se bazează pe comparaţia curenţilor din cele două linii, acţionînd în funcţie de diferenţa fazorială a acestor curenţi. În regim normal sau la scurtcircuite exterioare, curenţii menţionaţi sînt egali şi diferenţa lor (reprezentînd un curent de dezechilibru) are valori reduse, care nu pot provoca acţionarea protecţiei. La scurtcircuit pe una din linii, cei doi curenţi nu mai sînt egali, diferenţa lor are valori importante şi protecţia acţionează.

● Protecţiile comparative asigură lichidarea rapidă a defectelor pe toată lungimea liniilor protejate, datorită introducerii unor legături prin conductoare auxiliare între protecţiile direcţionale de la cele două capete ale fiecărei linii. Prin aceste legături, protecţia de la unul din capetele liniei poate comanda fără temporizare şi declanşarea întrerupătorului de la capătul opus.

● Canalele de înaltă frecvenţă, din cadrul protecţiilor prin înaltă frecvenţă, se realizează prin intermediul conductoarelor liniei protejate sau sub forma unor canale radio.

● Protecţiile prin înaltă frecvenţă sînt fie protecţii direcţionale cu blocaj prin înaltă frecvenţă, fie protecţii diferenţiale de fază.

VERIFICAREA CUNOŞTINŢELOR

1. Ce mărime controlează elementele de măsură din protecţiile de distanţă?
   a) curentul?
   b) tensiunea?
   c) impedanţa?
2. Ce performanţă asigură ansamblul elementelor de măsură, de timp şi direcţionale?
   a) selectivitatea?
   b) sensibilitatea?
   c) siguranţa?
3. Care este aspectul caracteristicilor de timp ale protecţiilor de distanţă?
   a) în trepte crescătoare cu creşterea impedanţei măsurate?
   b) în trepte descrescătoare cu creşterea impedanţei măsurate?
   c) cu variaţie liniară cu impedanţa măsurată?
4. Cum se reprezintă caracteristicile de acţionare ale releelor de impedanţă?
   a) în planul complex?
   b) prin intermediul unor diagrame fazoriale?
   c) prin intermediul unor diagrame în funcţie de timp?

5. Ce performanţă asigură elementele de blocare din cadrul protecţiilor de distanţă?
   a) rapiditatea?
   b) sensibilitatea?
   c) siguranţa?
6. Care este rolul elementelor de comutare din schemele de elemente ale protecţiilor de distanţă?
   a) să se asigure o funcţionare rapidă?
   b) să asigure aplicarea (la bornele elementelor direcţional şi de măsură) a mărimilor aferente fazelor defecte?
   c) să împiedice acţionări greşite?
7. Cum se obţin protecţii de distanţă care asigură lichidarea rapidă, de la ambele capete ale liniei, a defectelor apărute în orice punct al liniei protejate?
   a) prin renunţarea la caracteristicile de timp în trepte şi la selectivitate?
   b) prin interdeclanşare?
   c) prin folosirea unor relee de impedanţă care nu acţionează la scăderea impedanţei sub o valoare stabilită?
8. Pînă la ce lungimi de linii se folosesc protecţii diferenţiale longitudinale în formă obişnuită?
   a) cîteva sute de metri?
   b) 20 km?
   c) cîteva zeci de kilometri?
9. Din ce considerente protecţiile diferenţiale în formă obişnuită nu pot fi folosite la linii de lungimi mai mari decît cele la care se referă întrebarea nr. 8?
   a) dificultăţi legate de rapiditatea funcţionării?
   b) dificultăţi legate de conectarea releelor la circuitul diferenţial?
   c) dificultăţi legate de creşterea erorilor ca urmare a creşterii impedanţei conductoarelor circuitului diferenţial?
10. Ce măsuri se prevăd pentru a reduce de la patru la două numărul conductoarelor din circuitul diferenţial?
    a) folosirea unor filtre combinate sau a unor transformatoare sumatoare?
    b) instalarea transformatoarelor de curent numai pe una din faze?
    c) conexiuni speciale ale transformatoarelor de curent?
11. Pe ce principiu se bazează realizarea protecţiilor diferenţiale transversale ale liniilor paralele?
    a) pe controlul curentului din fiecare linie?
    b) pe controlul diferenţei fazoriale a curenţilor din cele două linii?
    c) pe controlul defazajelor dintre curenţii celor două linii?
12. Cum se asigură lichidarea rapidă a defectelor pe toată lungimea liniei protejate în cazul protecţiilor secţionale?
    a) prin renunţarea la selectivitate?
    b) prin transmiterea unor comenzi prin conductoare auxiliare între protecţiile de la cele două capete?
    c) prin folosirea unor principii diferite de cel direcţional?
13. De-a lungul căror linii se transmit semnale în cazul protecţiilor direcţionale cu bloca prin înaltă frecvenţă?
    a) prin linia defectă?
    b) prin linia defectă şi prin linii sănătoase?
    c) prin linii sănătoase?
14. Ce operaţie efectuează protecţiile diferenţiale de fază?
    a) compararea defazajelor curenţilor de la cele două capete ale liniei protejate?
    b) compararea amplitudinilor curenţilor de la cele două capete ale liniei protejate?
    c) compararea tensiunilor de la cele două capete ale liniei protejate?

RĂSPUNSURI CORECTE LA ÎNTREBĂRI

Cap. 1. (1) — (c); (2) — (c); (3) — (a); (4) — (a).
Cap. 2. (1) — (c); (2) — (b); (3) — (c); (4) — (b); (5) — (b); (6) — (c); (7) — (a); (8) — (a).
Cap. 3. (1) — (c); (2) — (c); (3) — (b); (4) — (c); (5) — (b); (6) — (c); (7) — (c).
Cap. 4 (1) — (a); (2) — (b); (3) — (a); (4) — (c); (5) — (c); (6) — (a).
Cap. 5. (1) — (c); (2) — (b); (3) — (b); (4) — (a); (5) — (a); (6) — (c); (7) — (b).
Cap. 6. (1) — (b); (2) — (a); (3) — (c); (4) — (a); (5) — (c).
Cap. 7 (1) — (b); (2) — (c); (3) — (b); (4) — (c).
Cap. 8. (1) — (b); (2) — (c); (3) — (a); (4) — (c); (5) — (c); (6) — (a); (7) — (c).
Cap. 9. (1) — (c); (2) — (b); (3) — (a); (4) — (a); (5) — (c); (6) — (a); (7) — (c).
Cap. 10. (1) — (c); (2) — (c); (3) — (a).
Cap. 11. (1) — (b); (2) — (a); (3) — (b); (4) — (b); (5) — (b)
Cap. 12. (1) — (b); (2) — (c); (3) — (a); (4) — (c); (5) — (c); (6) — (b); (7) — (a); (8) — (c).
Cap. 13. (1) — (a); (2) — (c); (3) — (b); (4) — (c).
Cap. 14. (1) — (c); (2) — (a); (3) — (a); (4) — (a); (5) — (c); (6) — (b); (7) — (b); (8) — (b); (9) — (c); (10) — (a); (11) — (b); (12) — (b); (13) — (c); (14) — (a).

CUPRINS

Plan editură 11.345. Tiraj 5.400 + 65 ex. leg. 1/2. Coli de tipar 15,50. Bun de tipar 19.07.77.
Apărut 1977.



Tiparul executat sub comanda
nr. 1226 la
Întreprinderea Poligrafică
„13 Decembrie 1918"
str. Grigore Alexandrescu nr. 89—97
București,
Republica Socialistă România

Lei 11,70

EDITURA DIDACTICĂ ȘI PEDAGOGICĂ, BUCUREȘTI – 1977